DIE NATURWISSENSCHAFTEN

16. Jahrgang | 13. April 1928 | Heft 15

Das Quantenpostulat und die neuere Entwicklung der Atomistik[1].

Von N. Bohr, Kopenhagen.

In Zusammenhang mit der Diskussion der physikalischen Deutung der in den letzten Jahren entwickelten quantentheoretischen Methoden möchte ich gern die folgenden allgemeinen Bemerkungen über die der Beschreibung atomarer Erscheinungen zu Grunde liegenden Prinzipien vorbringen, welche vielleicht zu der Versöhnung der auf diesem Gebiet so stark voneinander abweichenden Ansichten beitragen können.

§ 1. *Quantenpostulat und Kausalität.*

Charakteristisch für die Quantentheorie ist die Erkenntnis einer fundamentalen Begrenzung der klassischen physikalischen Begriffe, wenn sie auf atomare Phänomene angewandt werden. Die hieraus sich ergebende Sachlage ist von besonderer Art, weil unsere Deutung des Erfahrungsmaterials wesentlich auf der Anwendung der klassischen Begriffe beruht. Ungeachtet der Schwierigkeiten, die infolgedessen einer Formulierung des Inhaltes der Quantentheorie entgegenstehen, scheint es, wie wir sehen werden, daß der Sinn der Theorie zum Ausdruck gebracht werden kann durch das sog. Quantenpostulat, wonach jeder atomare Prozeß einen Zug von Diskontinuität oder vielmehr Individualität enthält, der den klassischen Theorien vollständig fremd ist und durch das Plancksche Wirkungsquantum gekennzeichnet ist.

Dieses Postulat hat einen Verzicht, betreffend die kausale raum-zeitliche Beschreibung der atomaren Phänomene zur Folge. In der Tat beruht unsere gewöhnliche Beschreibung der Naturerscheinungen letzten Endes auf der Voraussetzung, daß die in Rede stehenden Phänomene beobachtet werden können, ohne sie wesentlich zu beeinflussen. Dies tritt auch deutlich zutage in der Formulierung der Relativitätstheorie, die für die Klärung der klassischen Theorien so fruchtbar gewesen ist. Wie von Einstein hervorgehoben, beruht jede Beobachtung oder Messung schließlich auf dem Zusammenfallen zweier unabhängigen Ereignisse im selben Raum-Zeit-Punkt. Eben dieses Zusammenfallen wird nicht berührt durch den Unterschied, den die Raum-Zeit-Beschreibung verschiedener Beobachter im übrigen aufweisen mag. Nun bedeutet aber das Quantenpostulat, daß jede Beobachtung atomarer Phänomene eine nicht zu vernachlässigende Wechselwirkung mit dem Messungsmittel fordert, und daß also weder den Phänomenen noch dem Beobachtungsmittel eine selbständige physikalische Realität im gewöhnlichen Sinne zugeschrieben werden kann. Überhaupt enthält der Begriff der Beobachtung eine Willkür, indem er wesentlich darauf beruht, welche Gegenstände mit zu dem zu beobachtenden System gerechnet werden. Letzten Endes wird jede Beobachtung selbstverständlich auf unsere Sinnesempfindungen zurückgeführt werden können. Der Umstand aber, daß man bei der Deutung von Beobachtungen immer theoretische Vorstellungen heranziehen muß, bringt mit sich, daß es für jeden einzelnen Fall eine Frage der Zweckmäßigkeit ist, an welcher Stelle man den Begriff der Beobachtung und den mit dem Quantenpostulat verbundenen „irrationalen" Zug der Beschreibung einführt.

Dieser Sachverhalt bringt weitgehende Konsequenzen mit sich. Einerseits verlangt die Definition des Zustandes eines physikalischen Systems, wie gewöhnlich aufgefaßt, das Ausschließen aller äußeren Beeinflussungen; dann ist aber nach dem Quantenpostulat auch jede Möglichkeit der Beobachtung ausgeschlossen, und vor allem verlieren die Begriffe Zeit und Raum ihren unmittelbaren Sinn. Lassen wir andererseits, um Beobachtungen zu ermöglichen, eventuelle Wechselwirkungen mit geeigneten, nicht zum System gehörigen, äußeren Messungsmitteln zu, so ist der Natur der Sache nach eine eindeutige Definition des Zustandes des Systems nicht mehr möglich, und es kann von Kausalität im gewöhnlichen Sinne keine Rede sein. Nach dem Wesen der Quantentheorie müssen wir uns also damit begnügen, die Raum-Zeit-Darstellung und die Forderung der Kausalität, deren Vereinigung für die klassischen Theorien kennzeichnend ist, als komplementäre aber einander ausschließende Züge der Beschreibung des Inhalts der Erfahrung aufzufassen, die die Idealisation der Beobachtungs- bzw. Definitionsmöglichkeiten symbolisieren. Ebenso wie man nach der Relativitätstheorie erkennt, daß die Zweckmäßigkeit der scharfen, von unseren Sinnen verlangten Trennung zwischen Raum und Zeit nur darauf beruht, daß die gewöhnlich vorkommenden relativen Geschwindigkeiten klein sind gegenüber der Ge-

[1] Dieser Aufsatz gibt im wesentlichen den Inhalt eines Vortrages über den gegenwärtigen Stand der Quantentheorie wieder, der bei Gelegenheit der Voltafeier am 16. September 1927 in Como gehalten wurde. Für eine Übersicht des Standes der Theorie unmittelbar vor der Entwicklung der neuen Hilfsmittel sei auf einen in dieser Zeitschrift veröffentlichten Vortrag des Verfassers „Atomtheorie und Mechanik" (Naturwissenschaften 14, 1. 1926) hingewiesen. Die inzwischen stattgefundene außerordentliche Entwicklung hat eine sehr umfangreiche Literatur hervorgerufen. Hier haben wir uns mit einigen im Texte befindlichen Hinweisen begnügen müssen auf neuere Arbeiten, die für die folgenden Betrachtungen besonders in Frage kommen

schwindigkeit des Lichts, dürfte die Entdeckung der Quantentheorie die Erkenntnis gebracht haben, daß die Angemessenheit der ganzen kausalen raumzeitlichen Anschauungsweise nur von der Kleinheit des Wirkungsquantums gegenüber den für die gewöhnlichen Sinnesempfindungen in Betracht kommenden Wirkungen bedingt ist. In der Tat stellt uns bei der Beschreibung der atomaren Phänomene das Quantenpostulat vor die Aufgabe der Ausbildung einer „Komplementaritätstheorie", deren Widerspruchsfreiheit nur durch das Abwägen der Definitions- und Beobachtungsmöglichkeiten beurteilt werden kann.

Diese Auffassung kommt schon zur Geltung bei der vieldiskutierten Frage der Natur des Lichts und der Bausteine der Materie. Was das Licht betrifft, so wird seine raumzeitliche Ausbreitung bekanntlich in sinngemäßer Weise durch die elektromagnetische Lichttheorie dargestellt. Insbesondere werden sowohl die Interferenzerscheinungen im leeren Raum als auch die optischen Eigenschaften materieller Medien in lückenloser Weise durch das wellentheoretische Superpositionsprinzip beherrscht. Nichtsdestoweniger findet die Erhaltung von Energie und Impuls bei der Wechselwirkung von Strahlung und Materie, wie sie bei dem photoelektrischen Effekt und dem Comptoneffekt zum Vorschein kommt, gerade durch die von EINSTEIN entwickelte Lichtquantenvorstellung ihren sinngemäßen Ausdruck. Die Zweifel einerseits an der strengen Aufrechterhaltung des Superpositionsprinzips, andererseits an der allgemeinen Gültigkeit der Erhaltungssätze, zu denen dieser scheinbare Widerspruch Anlaß gegeben hat, sind bekanntlich in entscheidender Weise durch direkte Versuche widerlegt. Diese Sachlage dürfte die Undurchführbarkeit einer kausalen raum-zeitlichen Beschreibung der Lichterscheinungen klarstellen. Soweit wir die Gesetze der raum-zeitlichen Ausbreitung der Lichtwirkungen zu verfolgen wünschen, sind wir dem Quantenpostulat zufolge auf statistische Betrachtungen angewiesen. Demgegenüber bedeutet die Aufrechterhaltung der Kausalitätsforderung bei den einzelnen, durch das Wirkungsquantum gekennzeichneten Lichtprozessen einen Verzicht hinsichtlich der raum-zeitlichen Verhältnisse. Natürlich kann von einer völlig unabhängigen Anwendung der Raum-Zeitbeschreibung und des Kausalitätsbegriffes niemals die Rede sein. Vielmehr stellen die beiden Auffassungen der Natur des Lichtes zwei verschiedene Versuche einer Anpassung der experimentellen Tatsachen an unsere gewöhnliche Anschauungsweise dar, durch welche die Begrenzung der klassischen Begriffe in komplementarer Weise zum Ausdruck kommt.

Zu einer analogen Schlußfolgerung führt die Betrachtung der Eigenschaften materieller Teilchen. Die Individualität der elektrischen Elementarteilchen dürfte aus den allgemeinsten Erfahrungen hervorgehen. Nichtsdestoweniger ist man gezwungen, um verschiedene Tatsachen, namentlich die kürzlich entdeckte selektive Reflexion von Elektronen an Metallkrystallen, zu erklären, das wellentheoretische Superpositionsprinzip heranzuziehen, wie es den ursprünglichen Ideen von L. DE BROGLIE entspricht. Ähnlich wie bei dem Licht stehen wir also, solange wir uns an klassische Begriffe halten, auch bei der Frage des Wesens der Materie vor einem unvermeidbaren Dilemma, das eben als ein sinngemäßer Ausdruck für die Analyse des Erfahrungsmaterials zu betrachten sein dürfte. In der Tat handelt es sich hier nicht um einander widersprechende, sondern um komplementäre Auffassungen der Erscheinungen, die erst zusammen eine naturgemäße Verallgemeinerung der klassischen Beschreibungsweise darbieten. Bei der Diskussion dieser Fragen darf nicht außer acht gelassen werden, daß es sich, sowohl bei der Strahlung im leeren Raum wie bei den isolierten materiellen Partikeln, gemäß der hier vertretenen Auffassung um Abstraktionen handelt, weil ihre Eigenschaften zufolge des Quantenpostulats nur durch ihre Wechselwirkung mit anderen Systemen der Definition und Beobachtung zugänglich sind. Nichtsdestoweniger bilden diese Abstraktionen, wie wir sehen werden, ein unentbehrliches Mittel, dem Inhalt der Erfahrungen im Anschluß an unsere gewöhnliche Anschauung Ausdruck zu geben.

Die Schwierigkeiten, die in der Quantentheorie einer kausalen raum-zeitlichen Beschreibung entgegenstehen und die seit langem Gegenstand der Diskussion gewesen, sind in letzter Zeit durch die Entwicklung der neuen symbolischen Methoden in den Vordergrund des Interesses gerückt. Ein wichtiger Beitrag zur Frage der widerspruchsfreien Anwendung dieser Methoden wurde neuerdings von HEISENBERG (Zeitschr. f. Phys. **43**, 172. 1927) gegeben. In dieser Verbindung hat er besonders die eigentümliche reziproke Unsicherheit betont, die jeder Messung atomarer Größen anhaftet. Bevor wir auf seine Betrachtungen näher eingehen, wird es aber zweckmäßig sein, zu zeigen, wie der in dieser Unsicherheit hervortretende komplementäre Zug der Beschreibung schon bei einer Analyse der einfachsten Begriffe, welche der Deutung der Erfahrungen zu Grunde liegen, als unvermeidbar erscheint.

§ 2. *Wirkungsquantum und Kinematik.*

Der grundsätzliche Gegensatz zwischen Wirkungsquantum und klassischen Begriffen erhellt sofort aus den einfachen Formeln, welche die gemeinsame Grundlage der Lichtquantentheorie und der Wellentheorie materieller Teilchen bilden. Bezeichnen wir die PLANCKsche Konstante mit h, so haben wir bekanntlich

$$E\tau = I\lambda = h \qquad (1)$$

wo E und I Energie und Impuls, τ und λ die zugeordnete Schwingungsdauer und Wellenlänge bedeuten. In diesen Formeln stehen die zwei erwähnten Auffassungen des Lichts und der Materie

einander schroff gegenüber. Während Energie und Impuls dem Partikelbegriff angehören und also nach der klassischen Auffassung durch Raum-Zeitkoordinaten gekennzeichnet werden können, so beziehen sich Schwingungsdauer und Wellenlänge auf einen in raum-zeitlicher Hinsicht unbegrenzten ebenen harmonischen Wellenzug. Erst die Heranziehung des Superpositionsprinzips ermöglicht einen Anschluß an die gewöhnliche Beschreibungsweise. In der Tat kann eine Begrenzung der raum-zeitlichen Ausdehnung der Wellenfelder immer als Folge der Interferenz innerhalb einer Gruppe von harmonischen Elementarwellen aufgefaßt werden. Wie von DE BROGLIE (Thèse, Paris 1924) nachgewiesen, läßt sich nun die Translationsgeschwindigkeit der den Wellen zugeordneten Individuen eben durch die sog. Gruppengeschwindigkeit repräsentieren. Bezeichnen wir eine ebene Elementarwelle mit

$$A \cos 2\pi(\nu t - x\sigma_x - y\sigma_y - z\sigma_z + \delta)$$

wo A und δ Konstante sind, die bzw. Amplitude und Phase bestimmen. Die Größe $\nu = \frac{1}{\tau}$ ist die Schwingungszahl, σ_x, σ_y, σ_z sind die Wellenzahlen in Richtung der Koordinaten und können als Komponenten der Wellenzahl $\sigma = \frac{1}{\lambda}$ in der Fortpflanzungsrichtung betrachtet werden. Während $\frac{\nu}{\sigma}$ die Wellen- oder Phasengeschwindigkeit darstellt, ist die Gruppengeschwindigkeit durch $\frac{d\nu}{d\sigma}$ definiert. Nach der Relativitätstheorie haben wir nun für eine Partikel mit der Geschwindigkeit v

$$I = \frac{v}{c^2} E \quad \text{und} \quad v dI = dE,$$

wo c die Lichtgeschwindigkeit bezeichnet. Nach Formel (1) ist also die Phasengeschwindigkeit gleich $\frac{c^2}{v}$ und die Gruppengeschwindigkeit gleich v. Der Umstand einerseits, daß erstere im allgemeinen größer ist als die Lichtgeschwindigkeit, weist direkt auf den symbolischen Charakter der Betrachtungen hin. Andererseits gibt die Möglichkeit die Partikelgeschwindigkeit mit der Gruppengeschwindigkeit zu identifizieren, einen Hinweis auf das Anwendungsgebiet von Raum-Zeitbildern in der Quantentheorie. Hier zeigt sich zugleich der komplementäre Charakter der Beschreibung, denn die Verwendung von Wellengruppen bringt notwendigerweise eine Unschärfe in der Definition von Schwingungsdauer und Wellenlänge mit sich und also auch in der Definition der nach den Relationen (1) zugeordneten Energie- und Impulsgrößen.

Ein begrenztes Wellenfeld läßt sich streng genommen nur durch Überlagerung von einer Mannigfaltigkeit von Elementarwellen darstellen, die allen möglichen Werten von ν und σ_x, σ_y, σ_z entsprechen. Der Größenordnung nach ist aber die mittlere Differenz dieser Werte bei zwei Elementarwellen der Gruppe im günstigsten Fall durch die Bedingung gegeben

$$\Delta t \Delta \nu = \Delta x \Delta \sigma_x = \Delta y \Delta \sigma_y = \Delta z \Delta \sigma_z = 1$$

wo Δt, Δx, Δy, Δz die Ausdehnung des Wellenfeldes in der Zeit und der den Koordinatenachsen entsprechenden Raumrichtungen angeben. Diese aus der Theorie der optischen Instrumente — besonders aus den von RAYLEIGH herrührenden Betrachtungen über das Auflösungsvermögen von Spektralapparaten — wohlbekannten Relationen drücken die Bedingung aus, daß die Wellenzüge sich auf der raum-zeitlichen Grenzfläche des Wellenfeldes durch Interferenz auslöschen können. Sie kann auch dahin gedeutet werden, daß der Gruppe als Ganzem keine Phase zukommt in dem Sinne, wie es bei den einzelnen Elementarwellen der Fall ist. Aus Formel (1) folgt also

$$\Delta t \Delta E = \Delta x \Delta I_x = \Delta y \Delta I_y = \Delta z \Delta I_z = h \qquad (2)$$

als Ausdruck für die größtmögliche Genauigkeit der Definition von Energie und Impuls der dem Wellenfeld zugeordneten Individuen. Im allgemeinen werden allerdings die Verhältnisse für die Zuordnung eines Energie- und Impulswertes mittels Formel (1) zu einem Wellenfeld noch weniger günstig sein. Auch wenn die Beschaffenheit der Wellengruppe anfänglich die Relationen (2) erfüllt, so wird im Laufe der Zeit ihre Ausdehnung solchen Änderungen unterliegen, daß sie zur Darstellung eines Individuums immer weniger geeignet wird. Eben in diesem Umstand ist ja der paradoxale Charakter der Frage der Natur des Lichts und der materiellen Teilchen begründet. Übrigens hängt die durch die Relation (2) ausgedrückte Begrenzung der klassischen Begriffe nahe zusammen mit der beschränkten Gültigkeit der klassischen Mechanik, die in der Wellentheorie der Materie der geometrischen Optik entspricht, in der die Wellenausbreitung durch „Strahlen" veranschaulicht wird. Nur in diesem Grenzfall lassen sich Energie und Impuls im Anschluß an Raum-Zeitbilder eindeutig definieren. Für eine allgemeine Definition dieser Begriffe sind wir direkt auf die Erhaltungssätze hingewiesen, deren sinngemäße Formulierung ein Grundproblem der später zu erwähnenden symbolischen Methoden gewesen ist.

In der Sprache der Relativitätstheorie läßt sich der Inhalt der Relationen (2) in die Aussage zusammenfassen, daß nach der Quantentheorie eine allgemeine reziproke Beziehung besteht zwischen der maximalen Schärfe der Definition der den Individuen zugeordneten Raum-Zeit- bzw. Energie-Impuls-Vektoren. Dieser Sachverhalt dürfte als ein einfacher symbolischer Ausdruck betrachtet werden für die komplementäre Natur der Raum-Zeitbeschreibung und der Kausalitätsforderung. Gleichzeitig erlaubt aber der allgemeine Charakter dieser Beziehung in gewissem Umfang die Erhaltungssätze mit der raum-zeitlichen Darstellung der Beobachtungen zu vereinbaren, indem anstatt

von in einem Raum-Zeitpunkt zusammenfallenden wohldefinierten Ereignissen die Rede ist von dem Zusammentreffen von ungenau definierten Individuen innerhalb endlicher Raum-Zeitgebiete.

Dieser Umstand erlaubt den wohlbekannten Paradoxien zu entgehen, welche die Beschreibung der Streuung der Strahlung durch freie elektrische Teilchen sowie der Zusammenstöße zweier Teilchen kennzeichnen. Nach den klassischen Begriffen verlangt die Beschreibung der Streuung eine endliche Ausdehnung der Strahlung in Raum und Zeit, während bei der vom Quantenpostulat geforderten Änderung der Bewegung des Elektrons scheinbar die Rede ist von einer momentanen, in einem Raumpunkt sich abspielenden Wirkung. Ebensowenig wie bei der Strahlung lassen sich aber beim Elektron Impuls und Energie definieren, ohne ein endliches Raum-Zeitgebiet in Betracht zu ziehen. Weiter setzt die Anwendung des Erhaltungssatzes auf den Prozeß voraus, daß die Genauigkeit der Definition des Impuls-Energievektors für Strahlung und Elektron dieselbe ist. Nach (2) kann also bei der Wechselwirkung beiden Individuen dasselbe Raum-Zeitgebiet zugeordnet werden.

Ganz Analoges gilt für den Stoß zwischen zwei materiellen Teilchen; allerdings war vor der Erkenntnis der Unentbehrlichkeit der Wellenvorstellung die Bedeutung des Quantenpostulats für diese Erscheinung nicht beachtet. In der Tat vertritt hier dieses Postulat die über die raumzeitliche Beschreibung hinausgehende, der Kausalitätsforderung entgegenkommende Annahme der Individualität der Teilchen. Während der Vorstellung der Lichtquanten nur durch die Erhaltungssätze von Energie und Impuls ein greifbarer Inhalt zukommt, ist bei den elektrischen Elementarteilchen in dieser Beziehung noch die Erhaltung der Elektrizitätsladung zu berücksichtigen. Es braucht kaum bemerkt zu werden, daß bei der näheren Beschreibung der Wechselwirkung der Individuen wir uns nicht mit den durch die Formeln (1) und (2) ausgedrückten Tatsachen begnügen können, sondern Hilfsmittel heranziehen müssen, welche erlauben, die für diese Wechselwirkung maßgebende Koppelung, wo gerade die Bedeutung der Elektrizitätsladung zum Vorschein kommt, in Betracht zu nehmen. Wie wir unten sehen werden, fordern diese Hilfsmittel aber einen noch weitergehenden Verzicht auf Anschaulichkeit im gewöhnlichen Sinne.

§ 3. *Messungen in der Quantentheorie.*

In seiner bereits erwähnten Untersuchung der Widerspruchsfreiheit der quantentheoretischen Methoden hat HEISENBERG die Relation (2) aufgestellt als Ausdruck der größtmöglichen Genauigkeit, mit welcher auf einmal Raum-Zeitkoordinaten und Impuls-Energiewerte einer Partikel gemessen werden können. Er stützt sich dabei auf die folgende Betrachtung: Einerseits läßt sich, etwa mittels eines optischen Instrumentes, die Lage einer Partikel mit jeder gewünschten Genauigkeit messen, wenn bei der Abbildung nur Strahlung von genügend kurzer Wellenlänge benutzt wird. Nach der Quantentheorie ist aber die Streuung der Strahlung vom Objekt immer mit einer endlichen Impulsänderung verbunden, die um so größer ist, je kürzer die Wellen sind. Andererseits kann der Impuls einer Partikel etwa durch Messung seiner Geschwindigkeit durch den Dopplereffekt der Streustrahlung mit jeder gewünschten Genauigkeit gemessen werden, wenn nur das benutzte Licht so langwellig ist, daß der Rückstoß vernachlässigt werden kann; dann wird aber die Ortsbestimmung entsprechend ungenau.

Der Kern dieser Betrachtungen ist die Betonung der Unumgänglichkeit des Quantenpostulats bei der Beurteilung der Messungsmöglichkeiten. Indessen dürfte eine genauere Untersuchung der Definitionsmöglichkeiten jedoch erforderlich sein, um den komplementären Charakter der Beschreibung allseitig zum Ausdruck zu bringen. An sich würde eine unstetige Änderung von Energie und Impuls der Partikel beim Beobachtungsprozeß uns ja nicht verhindern, vor wie nach dem Prozesse sowohl Raum-Zeitkoordinaten wie Impuls-Energiegrößen genau angebbare Werte zuzuschreiben. Die reziproke Unsicherheit, die den Angaben solcher Werte stets anhaftet, ist, wie aus den obigen Auseinandersetzungen hervorgeht, vor allem von der begrenzten Genauigkeit bedingt, mit der Energie- und Impulsänderungen definiert werden können, wenn die zur Beobachtung benutzten Wellenfelder eine für die Festlegung der Raum-Zeitkoordinaten der Partikel genügende Begrenzung haben sollen.

Bei der Lagebestimmung mittels eines optischen Instruments muß in dieser Verbindung daran gedacht werden, daß die Abbildung immer auf der Benutzung eines konvergenten Strahlenbündels beruht. Bedeutet λ die Wellenlänge des Lichts, so ist das Auflösungsvermögen eines Mikroskops durch den bekannten Ausdruck $\frac{\lambda}{2\varepsilon}$ gegeben, wo ε die sog. numerische Apertur bezeichnet, d. h. den Sinus des halben Öffnungswinkels. Selbst wenn zur Beleuchtung des Objekts paralleles Licht benutzt wird und also der Impuls $\frac{h}{\lambda}$ des einfallenden Lichtquants auch der Richtung nach bekannt ist, wird die endliche Apertur uns verhindern, den bei der Streuung auftretenden Rückstoß genau zu kennen. War auch der Impuls des Partikels vor dem Streuungsprozeß genau bekannt, so wird also unserer Kenntnis seiner Impulskomponente in der Objektebene nach der Beobachtung eine Unsicherheit anhaften, die offenbar $\frac{2\varepsilon h}{\lambda}$ ist. Das Produkt der Genauigkeit, mit welcher Lagekoordinate und Impulskomponente in eine bestimmte Richtung angegeben werden können, ist also eben durch die Formel (2) ausgedrückt. Man

könnte denken, daß für die Beurteilung der Genauigkeit der Lagebestimmung nicht nur die Konvergenz, sondern auch die Länge des Wellenzugs von Bedeutung wäre, indem das Teilchen während der endlichen Beleuchtungszeit seine Lage ändern könnte. Da jedoch die genaue Kenntnis der Wellenlänge des Lichts für die obige Abschätzung nicht wesentlich ist, sieht man leicht ein, daß der Wellenzug bei jeder Apertur so kurz gewählt werden kann, daß eine Lageänderung des Teilchens während der Beobachtung vernachlässigt werden kann, verglichen mit der von dem Auflösungsvermögen definierten Genauigkeitsgrenze der Lagebestimmung.

Im Falle einer Impulsmessung mittels Dopplereffekts — unter Berücksichtigung des Comptoneffekts — wird man sich eines parallelen Wellenzugs bedienen. Für die Genauigkeit, mit der die Wellenlängenänderung der Streustrahlung gemessen werden kann, ist aber die Ausdehnung des Wellenzugs in der Fortpflanzungsrichtung wesentlich. Nehmen wir an, daß die Richtungen der einfallenden und gestreuten Strahlung bzw. dieselbe und die entgegengesetzte wie die Richtung der zu messenden Lage- und Impulskomponente sind, so kann $\frac{c\lambda}{2l}$ als Maß der Genauigkeit der Geschwindigkeitsmessung betrachtet werden, wo l die Länge des Wellenzugs bezeichnet. Dabei ist die Lichtgeschwindigkeit der Einfachheit wegen als groß gegenüber der Partikelgeschwindigkeit angenommen. Ist m die Masse des Partikels, so ist also die Unsicherheit, die der Angabe des Impulses nach der Beobachtung anhaftet, gleich $\frac{cm\lambda}{2l}$. In diesem Falle ist die Größe des Rückstoßes $\frac{2h}{\lambda}$ genügend wohl definiert, um zu keiner merklichen Unsicherheit in der Angabe des Impulses des Partikels nach der Beobachtung Anlaß zu geben. In der Tat erlaubt die allgemeine Theorie des Comptoneffekts die Geschwindigkeitskomponenten in Richtung der Strahlung vor und nach der Impulsänderung aus den Wellenlängen der einfallenden und gestreuten Strahlung zu berechnen. Wenn auch anfänglich die Lagekoordinaten der Partikel genau bekannt waren, wird aber eine Unsicherheit in der Angabe der Lage nach der Beobachtung bestehen. Wegen der Unmöglichkeit, dem Rückstoß einen genauen Zeitpunkt zuzuschreiben, können wir nämlich die mittlere Geschwindigkeit in der Beobachtungsrichtung während des Streuungsprozesses nur mit einer Genauigkeit $\frac{2h}{m\lambda}$ kennen. Die Unsicherheit der Lageangabe nach der Beobachtung ist daher $\frac{2hl}{mc\lambda}$. Auch hier ist also das Produkt der Genauigkeiten der Lage- und Impulsmessung durch die allgemeine Formel (2) gegeben.

Ebenso wie bei der Lagebestimmung läßt sich die Dauer des Beobachtungsprozesses bei Impulsmessungen beliebig kurz machen, wenn wir nur genügend kurzwellige Strahlung benutzen. Daß dabei der Rückstoß größer wird, beeinträchtigt ja, wie wir gesehen haben, die Meßgenauigkeit nicht. Es mag noch bemerkt werden, daß, wenn wir hier wiederholt von der Geschwindigkeit eines Partikels gesprochen haben, es sich nur um einen in diesem Zusammenhang zweckmäßigen Anschluß an die gewöhnliche Raum-Zeitbeschreibung handelt. Wie es schon aus den oben angeführten Betrachtungen von DE BROGLIE erhellt, muß der Geschwindigkeitsbegriff stets mit Vorbehalt angewendet werden. Eine eindeutige Definition dieses Begriffes ist ja auch durch das Quantenpostulat ausgeschlossen, was besonders zu bedenken ist, wenn man die Resultate von mehreren aufeinanderfolgenden Beobachtungen vergleicht. Wohl läßt sich der Ort eines Individuums zu zwei gegebenen Zeitpunkten mit jeder gewünschten Genauigkeit angeben. Wenn wir aber daraus in der gewohnten Weise die Geschwindigkeit des Individuums in dem Zwischenintervall berechnen wollen, so haben wir es mit einer Idealisation zu tun, aus der sich keine eindeutigen Schlüsse über das frühere oder zukünftige Verhalten des Individuums ziehen lassen.

Nach den obigen Auseinandersetzungen über die Definitionsmöglichkeiten der Eigenschaften der Individuen wird es, bei der Diskussion der Genauigkeit mit der Lage und Impuls eines Partikels gemessen werden können, offenbar keinen Unterschied ausmachen, wenn anstatt der Streuung von Strahlung Stöße mit materiellen Teilchen herangezogen werden. In beiden Fällen sehen wir, daß die in Frage kommende Unsicherheit ebenso sehr der Beschreibung des Messungsmittels wie derjenigen des Objektes anhaftet. In der Tat ist diese Unsicherheit unvermeidbar bei der Beschreibung des Verhaltens der Individuen in bezug auf ein in gewöhnlicher Weise durch starre Körper und unstörbare Uhren festgelegtes Koordinatensystem. Die Versuchsbedingungen — Öffnen und Schließen von Blenden usw. — erlauben ja nur Schlüsse über die raumzeitliche Ausdehnung der zugeordneten Wellenfelder zu ziehen.

Bei Zurückführung der Beobachtungen auf unsere Sinnesempfindungen kommt das Quantenpostulat nochmals bei der Wahrnehmung des Beobachtungsmittels in Betracht, sei es durch seine direkte Wirkung auf das Auge oder durch geeignetes Hilfsmittel wie Photographieplatten, WILSONsche Nebelfiguren usw. Man sieht jedoch leicht ein, daß das dabei hinzukommende statistische Element nicht die Unsicherheit der Beschreibung des Objektes beeinflussen wird. Man könnte sogar vermuten, daß die Willkür, was als Objekt und Beobachtungsmittel gerechnet wird, eine Möglichkeit eröffnen könnte, dieser Unsicherheit zu entgehen. Man könnte sich etwa fragen, ob bei der Lagemessung eines Partikels mittels eines optischen Instrumentes, nicht der bei der Streuung abgegebene Impuls mittels des Erhaltungssatzes aus

einer Messung der Impulsänderungen bestimmt werden könnte, welche das Mikroskop — einschließlich Lichtquelle und Photographieplatte — beim Beobachtungsprozeß erleidet. Eine nähere Untersuchung zeigt jedoch, daß eine solche Messung unmöglich ist, wenn man gleichzeitig die Lage des Mikroskops mit genügender Genauigkeit kennen will. In der Tat folgt aus den Erfahrungen, die in der Wellentheorie der Materie zum Ausdruck kommen, daß die Lage des Schwerpunktes eines Körpers und sein Gesamtimpuls, nur innerhalb der durch die Formel (2) angegebenen Genauigkeitsgrenzen definiert werden kann.

Streng genommen ist der Begriff der Beobachtung der kausalen raumzeitlichen Beschreibungsweise angehörend. Wegen des allgemeinen Charakters der Relation (2) läßt sich jedoch dieser Begriff auch in der Quantentheorie in widerspruchsfreier Weise verwenden, wenn nur die in dieser Relation zum Ausdruck kommende Unsicherheit in Betracht genommen wird. Wie HEISENBERG betont, bekommt man zumal eine lehrreiche Illustration zur quantentheoretischen Beschreibung atomarer (mikroskopischer) Erscheinungen, wenn man diese Unsicherheit mit derjenigen vergleicht, die in der gewöhnlichen Beschreibung der Naturerscheinungen, jeder Beobachtung wegen der Unvollkommenheit der Messungen anhaftet. Er bemerkt dabei, daß man schon bei den makroskopischen Vorgängen in gewissem Sinn sagen kann, daß sie durch wiederholte Beobachtungen entstehen. Es darf jedoch nicht vergessen werden, daß nach den klassischen Theorien jede nachfolgende Beobachtung den weiteren Verlauf der Erscheinungen mit immer größerer Sicherheit vorauszusehen erlaubt, indem sie eine stets genauere Kenntnis des Anfangszustandes des Systems bedeutet. Nach der Quantentheorie kommt eben wegen der nicht zu vernachlässigenden Wechselwirkung mit dem Meßmittel bei jeder Beobachtung ein ganz neues unkontrollierbares Element hinzu. Wie aus den obigen Auseinandersetzungen hervorgeht, ist ja die Messung der Lagekoordinaten eines Teilchens nicht nur mit einer endlichen Änderung der dynamischen Variablen verbunden, sondern die Festlegung seiner Lage bedeutet einen vollständigen Bruch in der kausalen Beschreibung seines dynamischen Verhaltens, ebenso wie die Kenntnis seines Impulses stets auf Kosten einer unausfüllbaren Lücke in der Verfolgung seiner raumzeitlichen Fortpflanzung gewonnen wird. Eben dieser Umstand bringt deutlich den komplementaren Charakter der quantentheoretischen Beschreibung atomarer Phänomene zutage, der als unmittelbare Folge des Gegensatzes zwischen dem Quantenpostulat und der den Beobachtungsbegriff kennzeichnenden Trennung zwischen Gegenstand und Messungsmittel zu betrachten ist.

§ 4. *Korrespondenzprinzip und Matrixtheorie.*

Bisher haben wir nur gewisse allgemeine Züge des Quantenproblems ins Auge gefaßt. Dem Wesen der Sache nach liegt aber das Hauptgewicht darauf, die Gesetze der Wechselwirkung der durch die Abstraktionen der isolierten Partikel sowie der Strahlung symbolisierten Gegenstände zu formulieren. Anhaltspunkte für diese Formulierung hat zunächst das Problem des Atombaues geliefert. Bekanntlich ist es hier möglich gewesen, schon mittels einer einfachen Anwendung der klassischen Begriffe, wesentliche Seiten der Erfahrung in direkter Anlehnung an das Quantenpostulat zu beleuchten. Dies beruht vor allem auf dem Umstand, daß für diese Fragen von einer näheren Beschreibung des raum-zeitlichen Verlaufs der Prozesse abgesehen werden kann. Zum Beispiel werden die Experimente über Anregung von Spektren durch Elektronenstoß oder Bestrahlung in sinngemäßer Weise wiedergegeben durch die Annahme diskreter stationärer Zustände und individueller Übergangsprozesse.

Es tritt hierbei der Gegensatz zu der gewöhnlichen Beschreibungsweise besonders schroff zutage, indem Spektrallinien, die nach der klassischen Auffassung demselben Zustand des Atoms zuzuschreiben wären, nach dem Quantenpostulat verschiedenen Übergangsprozessen entsprechen, die sich dem Atom nach der Anregung zur Wahl darbieten. Ungeachtet dieses Gegensatzes konnte jedoch ein formaler Anschluß an die klassischen Vorstellungen in den Grenzfällen erreicht werden, wo der relative Unterschied der Eigenschaften benachbarter Zustände asymptotisch verschwindet und wo bei statistischen Anwendungen die Diskontinuitäten vernachlässigt werden können. Dieser Anschluß ermöglichte an der Hand der Quantentheorie, in weitem Umfang die Gesetzmäßigkeiten der Spektren in Verbindung mit unseren Vorstellungen vom Atombau zu deuten.

Die Bestrebungen, in der Quantentheorie eine sinngemäße Verallgemeinerung der klassischen Theorien zu erblicken, führte zu der Aufstellung des sog. Korrespondenzprinzipes. Die Verwertung dieses Prinzipes für die Deutung der spektralen Ergebnisse beruhte auf einer symbolischen Benutzung der klassischen Elektrodynamik, bei der die einzelnen Übergangsprozesse an je eine der harmonischen Schwingungskomponenten der nach der gewöhnlichen Mechanik zu erwartenden Bewegung der Atomteilchen zugeordnet wurden. Außer in der erwähnten Grenze, wo der relative Unterschied aufeinanderfolgender stationärer Zustände vernachlässigt werden kann, erlaubte eine solche stückweise Anwendung der klassischen Theorien doch nur in gewissen Fällen eine streng quantitative Beschreibung der Erscheinungen. Hier sei besonders an die von LADENBURG und KRAMERS hergestellte Verbindung zwischen der klassischen Behandlung der Dispersionsphänomene und den von EINSTEIN entwickelten statistischen Gesetzen für die den Strahlungserscheinungen zugeordneten Übergangsprozesse erinnert. Obwohl eben KRAMERS' Behandlung des Disperions-

problems bedeutungsvolle Ansätze geliefert hat zu einer sinngemäßen Ausbildung der Korrespondenzbetrachtungen, haben sich erst mit Hilfe der in den letzten Jahren geschaffenen quantentheoretischen Methoden die in dem Korrespondenzprinzip enthaltenen Bestrebungen allgemein durchführen lassen.

Bekanntlich wurde die neue Entwicklung durch eine grundlegende Arbeit von HEISENBERG eingeleitet, worin es ihm gelang, sich von dem klassischen Bewegungsbegriff völlig frei zu machen, indem die gewöhnlichen kinematischen und mechanischen Größen von Anfang an durch Symbole ersetzt wurden, die sich direkt auf die von dem Quantenpostulat geforderten individuellen Prozesse beziehen. Dies wurde dadurch erreicht, daß die Fourierentwicklung einer klassisch-mechanischen Größe nach der Zeit durch ein Matrixschema ersetzt wurde, dessen Elemente rein harmonische Schwingungen symbolisieren und den möglichen Übergängen zwischen stationären Zuständen zugeordnet sind. Auf Grund der Forderung, daß die den Elementen zugeordneten Frequenzen stets dem Kombinationsprinzip der Spektrallinien genügen müssen, bieten sich, wie HEISENBERG zeigen konnte, einfache Rechenregeln für die Symbole dar, die eine direkte quantentheoretische Umschreibung der Grundgleichungen der klassischen Mechanik erlauben. Dieser kühne und sinnreiche Angriff auf das dynamische Problem der Atomtheorie zeigte sich von Anfang an als ein äußerst kräftiges und fruchtbares Mittel zur quantitativen Deutung der experimentellen Ergebnisse. Durch die Mitarbeit von BORN und JORDAN sowie von DIRAC wurde der Theorie eine Formulierung gegeben, die, was Geschlossenheit und Allgemeinheit betrifft, mit der klassischen Mechanik wetteifern kann. Es ist dabei ein besonderes Merkmal, daß das für die Quantentheorie charakteristische Element, die PLANCKsche Konstante, explizite nur in den Rechenregeln auftritt, denen die Symbole unterworfen sind. In der Tat gilt für die Matrizen, die kanonisch konjugierten Variablen im Sinne der HAMILTONschen Gleichungen entsprechen, nicht das Gesetz der kommutativen Multiplikation, sondern für zwei solche Größen q und p gilt die Vertauschungsregel

$$pq - qp = \sqrt{-1}\,\frac{h}{2\pi}; \qquad (3)$$

eine Relation, die den symbolischen Charakter der Theorie schlagend zum Ausdruck bringt. Die Matrixtheorie ist oft als Rechnen mit direkt beobachtbaren Größen bezeichnet. Es ist indessen zu bedenken, daß das beschriebene Verfahren eben auf solche Probleme beschränkt ist, wo bei der Anwendung des Quantenpostulats ein weitgehender Verzicht auf eine Raum-Zeitbeschreibung möglich ist, und deshalb die Frage der Beobachtung im eigentlichen Sinne in den Hintergrund tritt.

Für die weitere Verfolgung der Korrespondenz der Quantengesetze zur klassischen Mechanik ist die Betonung des von dem Quantenpostulat bedingten statistischen Charakters der quantentheoretischen Beschreibung von grundsätzlicher Bedeutung gewesen. Ein großer Fortschritt wurde hier erreicht durch die Verallgemeinerung der symbolischen Methode durch DIRAC und JORDAN, denen es gelang mit Matrizen zu operieren, die nicht nach den stationären Zuständen geordnet sind, sondern wo die zulässigen Werte irgendwelcher Variablen als Indizes der Matrixelemente auftreten können. Ebenso wie in der ursprünglichen Form der Theorie die „Diagonalelemente", welche sich auf nur einen stationären Zustand beziehen als Zeitmittelwerte der darzustellenden Größe gedeutet werden können, erlaubt die allgemeine Transformationstheorie der Matrizen, Mittelwerte einer mechanischen Größe darzustellen, bei deren Berechnung eine Anzahl den „Zustand" charakterisierende Variablen gegebene Werte haben, während die kanonisch konjugierten Variablen alle möglichen Werte durchlaufen. Anschließend an das von diesen Verfassern entwickelte Verfahren, sowie an Gedanken von BORN und PAULI hat nun HEISENBERG in der schon anfangs erwähnten Arbeit eine nähere Analyse des physikalischen Inhalts der Quantentheorie versucht, mit besonderem Hinblick auf den scheinbar paradoxalen Charakter der Vertauschungsrelation (3). In dieser Verbindung hat er die Beziehung

$$\Delta q \Delta p \sim h \qquad (4)$$

aufgestellt, welche ganz allgemein die größtmögliche Genauigkeit angeben soll, mit welcher auf einmal zwei kanonisch konjugierte Variablen beobachtet werden können. Auf diesem Wege ist es HEISENBERG gelungen, in sehr interessanter Weise manche Paradoxen zu beleuchten, die bei der Anwendung des Quantenpostulats zum Vorschein kommen und in weitgehendem Umfang die Widerspruchsfreiheit der symbolischen Methode nachzuweisen.

In Zusammenhang mit der hier betonten komplementären Natur der quantentheoretischen Beschreibung sind, wie oft erwähnt, bei der Beurteilung ihrer Widerspruchsfreiheit stets die Beobachtungs- und Definitionsmöglichkeiten zusammen ins Auge zu fassen. Eben bei der Diskussion dieser Frage hat, wie wir sehen werden, die von SCHRÖDINGER entwickelte Methode der Wellenmechanik sich als sehr hilfreich erwiesen, indem sie auch für Teilchen in Wechselwirkung eine allgemeine Anwendung des Superpositionsprinzips gestattet und daher einen unmittelbaren Anschluß erlaubt an die Betrachtungen über Strahlung und freie Partikel. Im folgenden werden wir auf das Verhältnis der Wellenmechanik zu der allgemeinen Formulierung der Quantengesetze mittels der Transformationstheorie der Matrizen zurückkommen.

§ 5. *Wellenmechanik und Quantenpostulat.*

Bei seinen Betrachtungen über die Wellen-

beschreibung der materiellen Teilchen hat DE BROGLIE von Anfang an auf die Möglichkeit hingewiesen, die stationären Zustände des Atoms als eine Interferenzerscheinung der den gebundenen Elektronen zugeordneten Phasenwellen zu veranschaulichen. Zwar führte dieser Gesichtspunkt in quantitativer Hinsicht zunächst nicht weiter als die älteren, auf die Anwendung klassischmechanischer Begriffe fußenden Methoden der Quantentheorie, zu deren Ausbildung besonders SOMMERFELD beigetragen hat. SCHRÖDINGER gelang es aber eine wellentheoretische Methode auszubilden, die neue Ausblicke eröffnet hat, und die von ausschlaggebender Bedeutung für die großen Fortschritte der Atomtheorie in der letzten Zeit gewesen ist. Bekanntlich liefern die Eigenschwingungen der SCHRÖDINGERschen Wellengleichung eine sinngemäße Repräsentation der stationären Zustände im Atom. Dabei wird die Energie jedes Zustandes mit der zugeordneten Schwingungsperiode nach der allgemeinen Quantenrelation (1) verknüpft. Auch gibt eine Abzählung der Knoten der Eigenschwingungen eine einfache Deutung des schon aus den älteren Methoden bekannten Begriffs der Quantenzahl, der aber in der Matrixformulierung zunächst verschwunden war. Weiter konnte SCHRÖDINGER den Lösungen der Wellengleichung eine kontinuierliche Elektrizitäts- und Stromdichte zuordnen, welche, auf eine Eigenschwingung angewandt, die elektrostatischen und magnetischen Eigenschaften des Atoms in dem entsprechenden stationären Zustand wiedergibt. In derselben Weise entspricht der Überlagerung zweier Eigenlösungen eine kontinuierliche Verteilung elektrischer Schwingungen, deren gemäß der klassischen Elektrodynamik berechnete Ausstrahlung eine lehrreiche Illustration zu den Folgerungen des Quantenpostulats und der durch die Matrixtheorie formulierten Korrespondenzforderung betreffs des Übergangsprozesses zwischen zwei Zuständen liefert. Eine für die weitere Entwicklung bedeutungsvolle Anwendung der SCHRÖDINGERschen Methode wurde von BORN gegeben durch seine Untersuchungen über das Problem des Zusammenstoßes von Atomen und freien elektrischen Teilchen. In diesem Zusammenhang gelang es ihm eine statistische Deutung der Wellenfunktionen anzugeben, die die Wahrscheinlichkeit der vom Quantenpostulat geforderten individuellen Übergangsprozesse zwischen stationären Zuständen zu berechnen erlaubt. Dies bedeutet auch eine wellenmechanische Formulierung des EHRENFESTschen Adiabatenprinzipes, dessen Fruchtbarkeit besonders aus den vielversprechenden Untersuchungen von HUND über das Problem der Molekülbildung hervorgeht.

Im Hinblick auf diese Resultate hat SCHRÖDINGER die Hoffnung ausgesprochen, daß eine konsequente Ausbildung der Wellentheorie es ermöglichen würde, die in dem Quantenpostulat enthaltene Irrationalität ganz zu vermeiden und allmählich eine Beschreibung der Atomphänomene nach den Richtlinien der klassischen Theorien auszubilden. Als Stütze für diese Auffassung hat SCHRÖDINGER in einer neuerlich erschienenen Arbeit (Ann. d. Phys. **83**, 956. 1927) die Tatsache betont, daß wir es nach der Wellentheorie mit einem einfachen Resonanzproblem zu tun haben, wenn es sich gemäß dem Quantenpostulat um einen diskontinuierlichen Energieaustausch zwischen Atomen handelt. Insbesondere wäre die Vorstellung der individuellen stationären Zustände eine Täuschung und ihre Anwendbarkeit nur eine Illustration der erwähnten Resonanz. Es ist indessen zu beachten, daß eben bei dem erwähnten Resonanzproblem von einem abgeschlossenen System die Rede ist, das sich nach der hier zugrunde gelegten Auffassung jeder Beobachtung entzieht. Überhaupt ist nach dieser Auffassung die Wellenmechanik — ebenso wie die Matriztheorie — als eine den Forderungen der Quantentheorie angemessene symbolische Umschreibung des entsprechenden Bewegungsproblems der klassischen Mechanik zu betrachten, die nur durch die explizite Heranziehung des Quantenpostulats gedeutet werden kann. Übrigens dürften die zwei Formulierungen des Wechselwirkungsproblems im Hinblick auf ihre Ausgangspunkte — die Wellen- bzw. Partikelauffassung der freien Individuen — als komplementär bezeichnet werden. Damit hängt auch der scheinbare Gegensatz zusammen, der bei der Verwertung des Energiebegriffs in den beiden Theorien auftritt.

Die grundsätzlichen Schwierigkeiten, die einer raumzeitlichen Beschreibung eines Systems von Teilchen in Wechselwirkung mit Hilfe der klassischen Begriffe entgegenstehen, erhellen sofort aus der Unentbehrlichkeit des Superpositionsprinzips bei der Beschreibung des Verhaltens der individuellen Teilchen. Wie wir gesehen haben, schließt schon bei einer freien Partikel die Kenntnis von Impuls und Energie die genaue Angabe seiner Raum-Zeitkoordinaten aus. Dies führt mit sich, daß eine unmittelbare Verwertung des Energiebegriffs im Anschluß an die klassische Vorstellung der potentiellen Energie des Systems ausgeschlossen ist. In der SCHRÖDINGERschen Wellengleichung sind nun diese Schwierigkeiten dadurch umgangen, daß der klassische Ausdruck der HAMILTONschen Funktion als ein Differentialoperator mit Hilfe der Beziehung

$$p = \sqrt{-1}\,\frac{h}{2\pi}\,\frac{\partial}{\partial q} \qquad (5)$$

ersetzt ist, wo p eine generalisierte Impulskomponente und q die kanonisch konjugierte Variable darstellt. Dabei wird der negative Wert der Energie als konjugiert zur Zeit betrachtet. In der Wellengleichung ist also sowohl Zeit und Raum als Energie und Impuls zunächst rein formal verwertet.

Der symbolische Charakter der SCHRÖDINGERschen Methode erhellt nicht nur daraus, daß ihre Einfachheit, ebenso wie die der Matrixmethode, auf einen wesentlichen Gebrauch von imaginären

arithmetischen Größen beruht. Vor allem ist aber schon deshalb keine Rede von einer unmittelbaren Verknüpfung mit unserer gewöhnlichen Anschauung, weil das durch die Wellengleichung dargestellte „geometrische" Problem an den sog. Koordinatenraum geknüpft ist, deren Dimensionszahl der Anzahl der Freiheitsgrade des Systems gleich ist und also im allgemeinen von der Dimensionszahl 3 des gewöhnlichen Raums verschieden ist. Übrigens unterliegt die Formulierung des Wechselwirkungsproblems durch die SCHRÖDINGERsche Wellengleichung ebenso wie die Matrixformulierung der Quantentheorie der Beschränkung, daß bei dem zugrunde gelegten klassisch-mechanischen Problem abgesehen wird von der nach der Relativitätstheorie geforderten endlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit der Kräfte.

Bei dem Wechselwirkungsproblem dürfte das Verlangen nach Anschaulichkeit im Anschluß an Raum-Zeitbilder auch nicht berechtigt sein. In der Tat gründen sich alle unsere Erfahrungen über die Eigenschaften der Atome, soweit sie nicht ihre Bewegung als Ganzes betreffen, auf ihre Strahlungs- und Stoßreaktionen. Letzten Endes wird also die Deutung der Beobachtungen durch die Strahlung im leeren Raum und die freien materiellen Teilchen vermittelt; auf diesen Abstraktionen fußt unsere ganze raum-zeitliche Auffassung der Erscheinungen sowie die Definition der Begriffe Impuls und Energie. Bei der Beurteilung der Anwendung dieser Hilfsmittel kann es nur auf Widerspruchsfreiheit ankommen, wobei vor allem die Definitions- und Beobachtungsmöglichkeiten zu berücksichtigen sind.

Die Eigenschwingungen der SCHRÖDINGERschen Wellengleichung liefern eben deshalb eine geeignete Repräsentation der stationären Zustände des Atoms, weil sie im Anschluß an die allgemeine Quantenrelation (1) eine eindeutige Definition der Energie des Systems erlauben. Dabei ist aber bei der Deutung der Beobachtungen ein weitgehender Verzicht hinsichtlich der Raum-Zeitbeschreibung unvermeidbar. Wie wir sehen werden, schließt die widerspruchsfreie Anwendung des Begriffs der stationären Zustände auch jede Möglichkeit einer näheren Kenntnisnahme des Verhaltens der einzelnen Partikeln im Atom aus. Bei Problemen, wo eine Beschreibung dieses Verhaltens wesentlich für die Deutung der Beobachtungen ist, sind wir auf eine Untersuchung der allgemeinen Lösung der Wellengleichung hingewiesen, die aus einer Superposition von Eigenlösungen hervorgeht. Es handelt sich hier um eine Komplementarität der Definitionsmöglichkeiten von analoger Art wie bei der früher betrachteten Frage der Eigenschaften des Lichts und der freien materiellen Teilchen. Während die Definition von Energie und Impuls der Individuen an den Begriff einer harmonischen Elementarwelle geknüpft war, beruhte, wie wir sahen, jeder raum-zeitliche Zug der Beschreibung der Phänomene auf einer Betrachtung der Interferenzen, die sich innerhalb einer solchen Gruppe von Elementarwellen abspielen. Auch in dem jetzt betrachteten Fall läßt sich die Übereinstimmung der Beobachtungsmöglichkeiten mit den Möglichkeiten der Definition direkt nachweisen.

Nach dem Quantenpostulat wird eine Beobachtung betreffend des Verhaltens der Elektronen, immer mit einer Änderung des Zustandes des Atoms begleitet sein. Wie von HEISENBERG betont, wird bei der Betrachtung von Atomen in stationären Zuständen niedriger Quantenzahlen diese Änderung sogar im allgemeinen in dem Hinauswerfen des betreffenden Elektrons aus dem Atom bestehen. Eine Beschreibung der „Bahn" des Elektrons im Atom durch nacheinanderfolgende Beobachtung ist also in einem solchen Fall ausgeschlossen. Dies hängt mit dem Umstand zusammen, daß aus Eigenschwingungen mit wenigen Knoten keine Wellengruppe aufgebaut werden kann, die die „Bewegung" eines Partikels auch nur annähernd repräsentieren kann. Die komplementäre Natur der Beschreibung kommt jedoch vor allem darin zum Ausdruck, daß die eindeutige Verwertung von Beobachtungen über das Verhalten der Partikeln im Atom stets auf der Möglichkeit beruht, während des Beobachtungsprozesses die Wechselwirkung zu vernachlässigen und die Partikeln als frei zu betrachten. Dies erfordert aber, daß die Dauer des Prozesses kurz ist gegenüber den natürlichen Perioden des Atoms, was zwangläufig eine Unsicherheit in der Kenntnis der in dem Prozeß überführten Energie mit sich bringt, die groß ist im Vergleich mit den Energiedifferenzen benachbarter stationärer Zustände.

Bei der Beurteilung der Beobachtungsmöglichkeiten muß überhaupt daran erinnert werden, daß den wellenmechanischen Lösungen nur insofern eine anschauliche Deutung beigelegt werden kann, als sie mit Hilfe des Begriffs der freien Partikeln beschreibbar sind. Gerade hier kommt der Unterschied zwischen der klassischen Mechanik und der quantentheoretischen Behandlung des Wechselwirkungsproblems zutage. In der ersteren ist deshalb ein solcher Vorbehalt nicht nötig, weil ja hier der Partikel eine unmittelbare „Realität" zugeschrieben wird, unabhängig davon, ob sie frei oder gebunden ist. Diese Sachlage ist vor allem zu beachten bei der widerspruchsfreien Verwertung der SCHRÖDINGERschen Elektrizitätsdichte als Maß für die Wahrscheinlichkeit der Anwesenheit der Elektronen innerhalb bestimmter Raumgebiete im Atom. Unter dem erwähnten Vorbehalt läßt sich diese Deutung unmittelbar auf die Annahme zurückführen, daß die Wahrscheinlichkeit der Anwesenheit eines freien Elektrons durch die dem Wellenfeld zugeordnete Elektrizitätsdichte in analoger Weise bestimmt ist wie die Wahrscheinlichkeit der Anwesenheit eines Lichtquants von der wellentheoretisch berechneten Strahlungsdichte.

Wie schon erwähnt, ist das Mittel für eine allgemeine widerspruchsfreie Verwertung der klas-

sischen Begriffe in der Quantentheorie durch die DIRAC-JORDANsche Transformationstheorie geschaffen, mit deren Hilfe HEISENBERG seine allgemeine Unsicherheitsrelation (4) formuliert hat. Eben in dieser Theorie hat auch die SCHRÖDINGERsche Wellengleichung eine lehrreiche Anwendung gefunden. In der Tat erscheinen hier die Eigenlösungen dieser Gleichung als Hilfsfunktionen, welche die Transformation vermitteln, von Matrizen, wo die Energiewerte des Systems als Indices benutzt werden, zu solchen, wo die Raumkoordinaten der Partikel als Indices herangezogen werden. In dieser Verbindung ist es auch von Interesse zu erwähnen, daß es JORDAN und KLEIN (Zeitschr. f. Phys. **45**, 751. 1927) neulich gelungen ist, zu der in der SCHRÖDINGERschen Wellengleichung enthaltenen Formulierung des Wechselwirkungsproblems zu gelangen, indem sie auf der Wellendarstellung der einzelnen Teilchen fußend, ein symbolisches Verfahren benutzt haben, das sich der von DIRAC in Anlehnung an die Matrixtheorie entwickelten tiefgehenden Behandlung des Strahlungsproblems anschließt, auf das wir unten zurückkommen werden.

§ 6. *Realität der stationären Zustände.*

Bei dem Begriff der stationären Zustände haben wir es, wie schon erwähnt, mit einer charakteristischen Anwendung des Quantenpostulats zu tun. Seinem Wesen nach verlangt dieser Begriff einen vollständigen Verzicht auf eine Zeitbeschreibung. Von dem hier vertretenen Gesichtspunkt aus ist eben dieser Verzicht die Bedingung für eine eindeutige Definition der Energie des Atoms. Streng genommen fordert der Begriff eines stationären Zustandes die Ausschaltung jeder äußeren Wechselwirkung mit nicht zu dem System gehörigen Individuen. Daß einem solchen abgeschlossenen System ein bestimmter Energiewert zugeschrieben wird, kann als unmittelbarer Ausdruck für die in dem Satz der Erhaltung der Energie niedergelegte Kausalitätsforderung angesehen werden. Hierin sehen wir die Berechtigung der der Benutzung des Quantenpostulats auf Fragen des Atombaues unterliegenden Annahme der supramechanischen Stabilität der stationären Zustände, wonach das Atom vor wie nach jeder äußeren Beeinflussung sich in einem wohldefinierten stationären Zustand befindet.

Bei der Beurteilung der wohlbekannten Paradoxen, welche diese Annahme für die Beschreibung der Stoß- und Strahlungsreaktionen mit sich bringt, ist es wesentlich, die durch die Relation (2) ausgedrückte Beschränkung der Definitionsmöglichkeiten der Reaktionsmittel in Betracht zu ziehen. In der Tat verlangt eine Definition der Energie der reagierenden Individuen, die genügend genau ist, um über Energieerhaltung bei der Reaktion reden zu können, nach dieser Relation die Zuordnung einer Zeitdauer zu der Reaktion, die lang ist verglichen mit der dem Übergangsprozeß zugeordneten Periode, welche nach (1) mit den Energiedifferenzen der stationären Zustände zusammenhängt. Dieser Sachverhalt kommt in interessanter Weise zur Geltung bei der Betrachtung der Prozesse, die sich beim Durchgang schnell bewegter Teilchen durch ein Atom abspielen. Nach der gewöhnlichen Kinematik wäre ja hier die effektive Stoßzeit sehr klein gegenüber den natürlichen Perioden des Atoms, und es schienen daher grundsätzliche Schwierigkeiten damit verbunden zu sein, den Erhaltungssatz mit der Annahme der Stabilität der stationären Zustände zu vereinbaren (vgl. Zeitschr. f. Phys. **34**, 142. 1925). In der Wellendarstellung dagegen ist die in Betracht kommende Reaktionszeit unmittelbar mit der Genauigkeit der Kenntnis der Energie des stoßenden Teilchens verbunden, und es kann von einem Widerspruch gegen den Erhaltungssatz nie die Rede sein. In Zusammenhang mit der Diskussion von Paradoxien der besprochenen Art hat CAMPBELL (Phil. Mag. **1**, 1106. 1926) vorgeschlagen, den Zeitbegriff selber als wesentlich statistisch zu betrachten. Nach der hier vertretenen Auffassung, wobei die Grundlage der Raum-Zeitbeschreibung in der Abstraktion der freien Individuen zu suchen ist, dürfte jedoch wegen der Relativitätsforderung eine solche grundsätzliche Trennung der Begriffe Zeit und Raum nicht durchführbar sein. Die Sonderstellung der Zeit in Verbindung mit dem Begriff der stationären Zustände dürfte, wie wir gesehen haben, in der speziellen Art der betreffenden Probleme begründet sein.

Die Anwendung des Begriffs der stationären Zustände verlangt, daß in jeder Beobachtung, etwa mit Hilfe von Stoß- oder Strahlungsreaktionen, die zwischen verschiedenen stationären Zuständen zu unterscheiden erlaubt, es berechtigt ist, von der Vorgeschichte des Atoms abzusehen. Im ersten Augenblick könnte es dabei als eine Schwierigkeit angesehen werden, daß die symbolischen quantentheoretischen Methoden jedem stationären Zustand eine Schwingungsphase zuschreiben, die eine der Idee der stationären Zustände widersprechende Verbindung mit einer eventuellen früheren Beeinflussung des Systems herzustellen scheint. Wenn es sich überhaupt um ein Zeitproblem handelt, kann jedoch nie von einem streng abgeschlossenen System die Rede sein. Die Verwendung von rein harmonischen Eigenschwingungen bei der Deutung der Beobachtungen stellt in der Tat nur eine zweckmäßige Idealisation dar, die für die genauere Diskussion immer durch eine einem endlichen Frequenzbereich entsprechende Gruppe von harmonischen Schwingungen zu ersetzen ist. Wie schon erwähnt wurde, ist es nun eine allgemeine Folge des Superpositionsprinzips, daß bei der Gruppe als Ganzem nie von einer Phase gesprochen werden kann in dem Sinne, wie es bei den einzelnen Elementarwellen oder Eigenschwingungen der Fall ist.

Diese aus der Theorie der optischen Instrumente wohlbekannte Unbeobachtbarkeit der Phase kommt in besonders einfacher Weise zur Geltung

bei der Diskussion des STERN-GERLACHschen Molekularstrahlversuchs, der ein so wichtiges Mittel für die Untersuchung der Eigenschaften einzelner Atome bedeutet. Wie von HEISENBERG auseinandergesetzt, ist die Bedingung für die Trennbarkeit der Atome verschiedener Orientierung im Felde, daß die Ablenkung der Strahlen größer ist, als die Beugung am Spalt der die Translationsbewegung der Atome repräsentierenden DE-BROGLIE-Wellen. Wie eine einfache Rechnung zeigt, verlangt diese Bedingung, daß das Produkt der zum Durchlaufen des Feldes nötigen Zeit mit der aus der endlichen Breite des Strahlungsbündels herrührenden Unbestimmtheit der Kenntnis der Energie eines Atoms im Felde mindestens gleich dem Wirkungsquantum sein muß. In diesem Resultat hat HEISENBERG eine Stütze erblickt für die Relation (2) betreffend die reziproke Unsicherheit, die den Angaben von Energie und Zeit anhaften. Es dürfte sich jedoch hier nicht einfach um eine Messung der Energie des Atoms zu einer gegebenen Zeit handeln. Da aber die Periode der Eigenschwingungen des Atoms im Felde mit seiner Gesamtenergie durch die allgemeine Relation (1) verknüpft ist, so sehen wir, daß die erwähnte Bedingung der Trennung eben den Verlust der Kenntnis der Phase bedeutet. Dieser Umstand erlaubt die scheinbaren Widersprüche zu vermeiden, die in einigen öfter diskutierten, auch von HEISENBERG besprochenen Gedankenexperimenten über die Kohärenz der Resonanzstrahlung auftraten.

Wenn wir oben von einem Atom als einem abgeschlossenen System gesprochen haben, so bedeutete dies die Vernachlässigung der Strahlungsemission, die auch ohne äußere Beeinflussung der Lebensdauer der stationären Zustände eine Grenze setzt. Die Berechtigung dieser Vernachlässigung für viele Anwendungen hängt damit zusammen, daß die nach der klassischen Elektrodynamik zu erwartende Koppelung zwischen Atom und Strahlungsfeld im allgemeinen sehr schwach ist gegenüber der Koppelung der Teilchen im Atom. In der Tat ist es möglich, bei der Beschreibung des Zustandes des Atoms in weitem Umfang die Rückwirkung der Strahlung zu vernachlässigen, indem von der Unschärfe der Energiewerte abgesehen wird, deren Zusammenhang mit der Lebensdauer der stationären Zustände der Relation (2) entspricht (vgl. Zeitschr. f. Phys. **13**, 117. 1923). Gerade hierauf beruht die Möglichkeit, im Anschluß an die klassische Elektrodynamik Schlüsse über die Beschaffenheit der Strahlung zu ziehen.

Die Behandlung des Strahlungsproblems nach den neuen quantentheoretischen Methoden bedeutete anfänglich eben eine quantitative Verwertung dieser Korrespondenzbetrachtung. Dies war ja der Ausgangspunkt der ursprünglichen HEISENBERGschen Überlegungen. Eine lehrreiche, auf das Korrespondenzprinzip sich stützende, Analyse der SCHRÖDINGERschen Behandlung der Strahlungserscheinungen ist neuerdings von KLEIN (Zeitschr. f. Phys. **41**, 407. 1927) gegeben. Bei der strengeren, von DIRAC (Proc. of the roy. soc. of London, Ser. A **114**, 243. 1927) begründeten Behandlung wird das Strahlungsfeld in das zu betrachtende abgeschlossene System mit einbezogen. Es wurde hierdurch ermöglicht, dem von der Quantentheorie verlangten individuellen Charakter der Strahlungsprozesse in sinngemäßer Weise Rechnung zu tragen und eine Dispersionstheorie aufzubauen, in welcher die endliche Breite der Spektrallinien berücksichtigt wird. Der Verzicht auf raum-zeitliche Anschaulichkeit, die diese Behandlung kennzeichnet, liefert einen eindrucksvollen Hinweis auf die grundsätzlich komplementäre Natur der quantentheoretischen Beschreibung. Nicht am wenigsten ist dies zu bedenken bei der Beurteilung der schroffen Abweichungen von der kausalen Beschreibungweise, der wir bei den Strahlungserscheinungen begegnen und auf die wir oben bei der Frage der Anregung von Spektren hingewiesen haben.

Mit Hinblick auf den von dem Korrespondenzprinzip verlangten asymptotischen Anschluß der Eigenschaften der Atome an die klassische Elektrodynamik könnte die gegenseitige Ausschließung des Begriffs der stationären Zustände und der Beschreibung des Verhaltens der einzelnen Teilchen im Atom als eine Schwierigkeit empfunden werden. Dieser Anschluß bedeutet ja, daß mechanische Bilder der Elektronenbewegung in sinnvoller Weise verwertet werden können, in der Grenze hoher Quantenzahlen, wo der relative Unterschied benachbarter stationärer Zustände asymptotisch verschwindet. Dabei handelt es sich doch keineswegs um einen allmählichen Übergang zu der klassischen Theorie, wo das Quantenpostulat allmählich überflüssig würde. Im Gegenteil beruhen die Schlüsse, die man mit Hilfe klassischer Bilder aus dem Korrespondenzprinzip ziehen konnte, eben auf der Aufrechterhaltung des Begriffs der stationären Zustände und der individuellen Übergangsprozesse auch in dieser Grenze.

Bei dieser Frage fanden gerade die neuen Methoden eine lehrreiche Anwendung. Wie SCHRÖDINGER (Naturwissenschaften **14**, 664. 1926) nachgewiesen hat, ist es möglich, in der erwähnten Grenze durch Superposition von Eigenschwingungen Wellengruppen aufzubauen, deren Ausdehnungen klein sind im Verhältnis zur „Größe" des Atoms und deren Fortpflanzung der klassischen Vorstellung von bewegten materiellen Teilchen beliebig nahe kommt, wenn die Quantenzahlen genügend groß genommen werden. In dem besonders einfachen Fall des harmonischen Oszillators konnte er zeigen, daß solche Wellengruppen sogar für unbegrenzte Zeiten zusammenhalten und in einer Weise hin und her pendeln, die dem klassischen Bewegungsbild entspricht. In diesem Umstand hat SCHRÖDINGER eine Stütze für die Hoffnung erblickt, eine reine Wellentheorie der Materie ohne Heranziehung des Quantenpostulats aufzubauen. Wie von HEISEN-

BERG näher auseinandergesetzt, bilden indessen die einfachen Verhältnisse beim Oszillator eine Ausnahme, die mit der rein harmonischen Natur der entsprechenden klassischen Bewegung zusammenhängt. Auch ist hier von keinem allmählichen Anschluß an das Problem der freien Teilchen die Rede. Im allgemeinen Fall werden die Wellengruppen sich allmählich über das ganze Gebiet des Atoms ausbreiten, und die Bewegung eines gebundenen Elektrons läßt sich nur während einer Anzahl von Umlaufen verfolgen, die von der Größenordnung der den Eigenschwingungen zugeordneten Quantenzahlen ist. Diese Frage ist näher untersucht worden in einer neulich erschienenen Arbeit von DARWIN (Proc. of the roy. soc. of London, Ser. A, **117**, 258. 1927), die eine Anzahl von lehrreichen Beispielen des Verhaltens von Wellengruppen bringt. Vom Standpunkt der Matrixtheorie wurde eine Behandlung analoger Probleme von KENNARD (Zeitschr. f. Phys. **44**, 326. 1927) durchgeführt.

Wir stoßen also hier wieder auf den Gegensatz zwischen dem wellentheoretischen Superpositionsprinzip und der Annahme der Individualität der Teilchen, den wir schon bei den freien Partikeln kennengelernt haben. Zugleich gibt der asymptotische Anschluß an die klassische Mechanik, die keinen grundsätzlichen Unterschied zwischen freien und gebundenen Partikeln kennt, die Möglichkeit einer besonders einfachen Illustration der obenstehenden Auseinandersetzungen betreffend die widerspruchsfreie Verwertung des Begriffs der stationären Zustände. Wie wir gesehen haben, verlangt der Nachweis eines stationären Zustandes durch Stoß- oder Strahlungsreaktionen eine Lücke in der Verfolgung der zeitlichen Zusammenhänge, die mindestens von der Größenordnung der Perioden ist, die den Übergangsprozessen zwischen benachbarten stationären Zuständen zugeordnet sind. In der Grenze hoher Quantenzahlen lassen sich nun eben diese Perioden als Umlaufsperioden deuten. Wir sehen also, daß es ausgeschlossen ist, eine kausale Verbindung herzustellen zwischen Beobachtungen, die die Festlegung eines stationären Zustandes erlauben, und früheren Beobachtungen über das Verhalten der einzelnen Partikeln im Atom.

Zusammenfassend dürfen wir wohl sagen, daß den Begriffen der stationären Zustände und der individuellen Übergangsprozesse innerhalb ihres Anwendungsgebietes ebenso viel oder wenig Realität zukommen wie den individuellen Teilchen selber. Im einen wie im anderen Fall haben wir der zur raumzeitlichen Beschreibungsweise komplementaren Kausalitätsforderung Ausdruck gegeben, deren sinnvolle Anwendung nur durch die Definitionsmöglichkeiten der betreffenden Begriffe begrenzt ist.

§ 7. *Das Problem der Elementarteilchen.*

Unter Berücksichtigung des von dem Quantenpostulat verlangten Zuges von Komplementarität scheint es in der Tat möglich, an der Hand der symbolischen Methoden eine widerspruchsfreie Beschreibung der atomaren Erscheinungen aufzubauen, die als eine sinngemäße Verallgemeinerung der gewöhnlichen kausalen Raum-Zeit-Beschreibung erscheint. Diese Auffassung bedeutet indessen nicht, daß die klassische Elektronentheorie als einfacher Grenzfall verschwindenden Wirkungsquantums zu betrachten wäre. Der auf Grund dieser Theorie angestrebte Anschluß an die Erfahrung beruht nämlich auf Annahmen, die von dem Problemkreis der Quantentheorie kaum zu trennen sind. Einen Hinweis hierauf gaben schon die bekannten Schwierigkeiten, die Individualität der elektrischen Elementarteilchen mit den allgemeinen mechanischen und elektrodynamischen Prinzipien zu vereinbaren. Auch die allgemeine Gravitationstheorie, wie sie in der Relativitätstheorie formuliert worden ist, hat in dieser Beziehung nicht die an sie gestellten Hoffnungen erfüllt. Eine befriedigende Lösung der hier berührten Fragen darf man wohl erst von einer sinngemäßen Umdeutung der allgemeinen Feldtheorie erwarten, in der das elektrische Elementarquantum seinen natürlichen Platz gefunden hat als ein Ausdruck für den die Quantentheorie charakterisierenden Zug von Individualität. Neuerdings hat KLEIN (Zeitschr. f. Phys. **46**, 188. 1927) auf die Möglichkeit hingewiesen, dieses Problem mit der auf KALUZA zurückgehenden fünfdimensionalen einheitlichen Darstellung von Elektromagnetismus und Gravitation zu verbinden. In der Tat stellt die Erhaltung der Elektrizität in dieser Theorie ein Analogon dar zu den Erhaltungssätzen von Energie und Impuls. Ebenso wie die letzteren Begriffe bei der Beschreibung der atomaren Phänomene als komplementär zur Raum-Zeitbeschreibung erscheinen, dürfte, wie KLEIN betont, die Angemessenheit der gewöhnlichen vierdimensionalen Beschreibung sowie ihre symbolische quantentheoretische Verwertung wesentlich darauf beruhen, daß in dieser die Elektrizitätsladung immer als wohldefiniertes Elementarquantum erscheint, und die konjugierte fünfte Dimension daher nicht direkt in der Deutung der Erfahrungen auftritt.

Ganz abgesehen von diesen ungelösten tiefliegenden Problemen hat die klassische Elektronentheorie bis in die letzte Zeit als Leitfaden eines weiteren Ausbaus der korrespondenzmäßigen Beschreibung gedient und zwar in Verbindung mit dem von COMPTON zuerst ausgesprochenen Gedanken, daß den Elementarteilchen neben ihrer Masse und Ladung noch ein magnetisches Moment zuzuschreiben ist, das von einem durch das Wirkungsquantum festgelegten Impulsmoment herrührt. Diese von GOUDSMIT und UHLENBECK in die Diskussion des Ursprungs des anomalen ZEEMANeffekts mit schlagendem Erfolg eingeführte Annahme hat sich, wie besonders HEISENBERG und JORDAN zeigen konnten, in Verbindung mit den neuen Methoden weitgehend bewährt. Ja, man kann wohl sagen, daß die Hypo-

these des Magnetelektrons zusammen mit dem von HEISENBERG (Zeitschr. f. Phys. 41, 239. 1927) klargestellten Resonanzproblem, das in der quantentheoretischen Beschreibung des Verhaltens von Atomen mit mehreren Elektronen auftritt, die korrespondenzmäßige Deutung der Gesetzmäßigkeiten der Spektren und des periodischen Systems zu einem gewissen Abschluß gebracht hat. Die diesem Angriff zugrundeliegenden Prinzipien haben sogar einen Weg geöffnet, Schlüsse über die Eigenschaften der Atomkerne zu ziehen. So ist es neulich DENNISON (Proc. of the roy. soc. of London, Ser. A 115, 483. 1927) in Anschluß an Gedanken von HEISENBERG und HUND zu zeigen gelungen, wie die Schwierigkeiten, die bisher mit der Erklärung der spezifischen Wärme des Wasserstoffes verbunden waren, umgangen werden können, wenn man annimmt, daß auch dem Proton ein Impulsmoment von demselben Betrag wie dem Elektron zukommt. Wegen seiner größeren Masse muß jedoch dem Proton ein viel kleineres magnetisches Moment als dem Elektron zugeschrieben werden.

Die Unzulänglichkeiten der bisherigen Methoden dem Problem der Elementarteilchen gegenüber, kommt bei den eben besprochenen Fragen darin zutage, daß sie keine eindeutige Begründung erlauben für die in dem von PAULI aufgestellten sog. Ausschließungsprinzip ausgedrückten Verschiedenheit des Verhaltens der elektrischen Elementarteilchen und der durch die Lichtquantenvorstellung symbolisierten „Individuen". Bei diesem für das Problem des Atombaues sowie für die neueste Entwicklung der statistischen Theorien so fruchtbaren Prinzip haben wir es ja mit einer von mehreren denkbaren Möglichkeiten zu tun, die jede für sich den Korrespondenzforderungen genügen würden. Übrigens begegnen wir bei der Frage des Magnetelektrons einem besonders lehrreichen Beispiel für die Schwierigkeit, der Relativitätsforderung in der Quantentheorie zu genügen. So war es bisher nicht möglich, die vielversprechenden Ansätze von DARWIN und PAULI zu einer für die Behandlung dieses Problems geeigneten Verallgemeinerung der quantentheoretischen Methoden in Übereinstimmung zu bringen mit der von THOMAS herrührenden relativitätskinematischen Betrachtung, die sich so wesentlich für die Erklärung der experimentellen Resultate erwiesen hat. In der allerletzten Zeit ist es indessen DIRAC (Proc. of the roy. soc. of London, Ser. A 117, 610. 1928) gelungen, das Problem des magnetischen Elektrons erfolgreich anzugreifen mit Hilfe einer neuartigen, äußerst sinnreichen Erweiterung der symbolischen Methode, die unter Beibehaltung der Übereinstimmung mit den spektralen Phänomenen der Relativitätsforderung Rechnung trägt. Dieser Angriff beruht nicht nur auf der durch den Gebrauch von imaginären Größen gekennzeichneten Komplexität der bisherigen Verfahren, sondern benutzt in den Grundgleichungen selber Zahlenkörper von einem noch höheren Komplexitätsgrad.

Seinem Wesen nach setzt schon die Formulierung des Relativitätsarguments die den klassischen Theorien eigentümliche Vereinigung der Raum-Zeitkoordination mit der Kausalitätsforderung voraus. Wir müssen deshalb bei der sinngemäßen Anpassung der Relativitätsforderung an das Quantenpostulat auf einen noch weiter gehenden Verzicht auf Anschaulichkeit im gewöhnlichen Sinne gefaßt sein, als bei den hier besprochenen quantentheoretischen Methoden. In der Tat befinden wir uns hier auf dem von EINSTEIN eingeschlagenen Weg der Anpassung unserer, den Sinnesempfindungen entlehnten, Anschauungsformen an die allmählich vertiefte Kenntnis der Naturgesetze. Die Hindernisse, denen wir auf diesem Wege begegnen, rühren vor allem daher, daß sozusagen jedes Wort der Sprache an diese Anschauungsformen geknüpft ist. In der Quantentheorie tritt uns diese Schwierigkeit sofort entgegen in der Frage der Unumgänglichkeit des dem Quantenpostulat innewohnenden Zuges von Irrationalität. Ich hoffe indessen, daß der Begriff der Komplementarität geeignet sein wird, die bestehende Sachlage zu kennzeichnen, die eine tiefe Analogie aufweisen dürfte mit den allgemeinen, in der Trennung von Subjekt und Objekt begründeten, Schwierigkeiten der menschlichen Begriffsbildung.

Über Variationserscheinungen bei Haustieren.

Von ERNST FEIGE, Breslau.

1. Die wirtschaftliche Bedeutung des Problems.

Trotz der gewaltigen Leistungssteigerung der deutschen Viehhaltung während der letzten Jahrzehnte des 19. Jahrhunderts bis zum Weltkriege betrug im Jahre 1926 der Einfuhrüberschuß an tierischen Erzeugnissen für die Ernährung rund 1,25 Milliarden RM.; hierzu ist noch, wenn auch nicht unmittelbar vergleichbar, der Einfuhrüberschuß an Futtermitteln usw. mit (1926) rund 1 Milliarde RM. zu rechnen. Es sind dies gewaltige Werte, obwohl sie im Vergleich mit der inländischen Produktion an sich nicht übermäßig hoch erscheinen. Allein der Wert der im Inlande erzeugten Milch und Milchprodukte kann auf annähernd 4 Milliarden RM. jährlich veranschlagt werden, obwohl die landwirtschaftliche Produktion als Folge der wirtschaftlichen Kriegserscheinungen gegenüber dem früheren Stand noch sehr eingeengt ist.

Im Hinblick auf die enge Verknüpfung aller Berufszweige eines hochentwickelten Wirtschaftskörpers bedeutet diese Frage aber nicht nur ein rein ökonomisches Problem, sondern sie steht auch in engster Wechselbeziehung zu den hygienischen und biologischen Verhältnissen beim Menschen. Infolge der starken Entwicklung der industriellen

Erzeugung ist der inländische Nahrungsspielraum und demzufolge auch die Volksvermehrung stärker fortgeschritten, als die landwirtschaftliche Produktion. Das wichtigste Produktionsmittel der Landwirtschaft, der Boden, ist nicht oder nur wenig ausdehnungsfähig, während sich der Industrie in dieser Beziehung praktisch kaum Hindernisse entgegenstellen, solange sie überhaupt noch über Absatzmöglichkeiten verfügt. Das spricht sich auch in der Entwicklung der beruflichen Gliederung des Volkes aus; mit zunehmender Volksdichte hat im Laufe des vergangenen Jahrhunderts die in der Land- und Forstwirtschaft beschäftigte Bevölkerung relativ einen Rückgang erlitten. Teils mußte der Bevölkerungsüberschuß von der Industrie usw., teils durch Auswanderung aufgenommen werden. Gerade die wirtschaftlichen Krisen in der jüngsten Vergangenheit haben gezeigt, welche Gefahren in volkshygienischer Hinsicht die starke Anhäufung von Menschenmassen ohne wirtschaftlichen Rückhalt im eigenen Lande in sich birgt. Jede Verlagerung des Schwergewichts der industriellen Produktions- und Absatzmöglichkeiten nach anderen Gebieten entzieht dem Großteil der Bevölkerung die Existenzmöglichkeiten und muß zu einer Proletarisierung (im biologischen Sinne) führen. Ähnliche Erscheinungen lassen sich im Laufe der Weltgeschichte übrigens öfter beobachten; es sei nur an die Entvölkerung des ehemals blühenden Mesopotamien erinnert. Nicht der Verfall der Bewässerungsanlagen, wie LIEBIG einst meinte, sondern der Verlust seiner Absatzgebiete durch den Aufschwung der westlichen Mittelmeerländer hat zweifellos zu einer Vernichtung der wirtschaftlichen und politischen Macht Mesopotamiens geführt. Die biologischen Wirkungen von Veränderungen des Nahrungsspielraums bei dem Menschen unterscheiden sich grundsätzlich kaum von denjenigen bei den Tiergemeinschaften. Alle Versuche zur Verbesserung rassehygienischer Schäden setzen die Schaffung oder Erhaltung eines gesunden wirtschaftlichen Gleichgewichts voraus. Die überstarke Zunahme der Industrie, so erstrebenswert sie sonst sein mag, führt die Völker aus einem stabilen in den labilen Zustand über.

Bei allen diesen Fragen lassen sich die wirtschaftlichen Gesichtspunkte von den rein biologischen sehr schwer trennen. Im allgemeinen Sinne besteht zwischen dem Wirtschaftskörper des Menschen, wie ihn die Berufsgliederung eines Volkes verdeutlicht und den Lebensgemeinschaften in der freien Natur kaum ein Unterschied. Die eingangs wiedergegebenen Zahlen für den Einfuhrüberschuß an tierischen Nahrungsmitteln bedeuten eine Existenzminderung im gleichen Betrage. Besteht eine Möglichkeit, den Fehlbetrag ohne Mehraufwendungen durch eine Veränderung der Leistungseigenschaften des einheimischen Viehbestandes zu ersetzen, so würde das nicht nur unmittelbar eine Stärkung des einheimischen landwirtschaftlichen Gewerbes bedeuten, sondern mittelbar für etwa 1 Million industrieller Bevölkerung eine unversiegbare Quelle der Lebensgestaltung, die durch ihre Unabhängigkeit von auswärtigen Einflüssen besonders wertvoll ist. Dabei ist angenommen, daß ein Betrag von 5000 RM. den Lebensstandard einer vierköpfigen Familie sichern kann. In Wirklichkeit würde sich das Ergebnis noch viel günstiger gestalten.

Es fragt sich nun, ob greifbare Möglichkeiten für eine dementsprechende Umgestaltung unserer Ernährungswirtschaft durch Umwandlung der Produktionsmittel vorliegen. Quantitativ läßt sich die Erzeugung auf zwei Wegen steigern: erstens durch volle Ausnutzung der individuellen Leistungsfähigkeit der Tiere, zweitens durch selektive Ausschaltung aller wenig leistungsfähigen Erblinien. Bisher wurden im Laufe des vergangenen Jahrhunderts die bedeutsamsten Erfolge auf dem ersten Wege erzielt, obwohl ein Vergleich hochentwickelter Zuchtstätten mit dem Landesdurchschnitt zeigt, daß wir den Höhepunkt der Entwicklung in dieser Beziehung auch noch nicht annähernd erreicht haben. Der durchschnittliche Milchertrag einer Kuh beispielsweise wird gegenwärtig mit etwa 2000 kg jährlich höchstens angenommen; dem stehen die Durchschnittsleistungen in den Kontrollvereinen mit etwa 3000 bis 4000 kg jährlich gegenüber. In Einzelfällen ist es sogar gelungen, den jährlichen Milchertrag einer Kuh bis auf 9000 kg zu steigern. Auf solche Einzelfälle läßt sich jedoch kein allzu großes Gewicht legen, weil die Wirtschaftlichkeit der Produktion dann nicht immer gewährleistet ist und das Optimum der Leistungsfähigkeit eines Tieres verhältnismäßig schnell nachläßt.

Jedenfalls sind auch in der Gegenwart bereits Möglichkeiten gegeben, durch Anwendung neuzeitlicher zootechnischer Methoden etwa den Einfuhrbedarf an Milch und Milcherzeugnissen entbehrlich zu machen. Das ist nur eine Frage der Organisation der öffentlichen Förderungsmaßnahmen. Für die Zukunft lautet das Problem aber anders. Nicht nur die Bevölkerungszunahme, sondern auch jede Steigerung des wirtschaftlichen Lebensniveaus der Gesamtbevölkerung muß die volle Ausnutzung der gegenwärtig vorhandenen Leistungsanlagen unserer Tierbestände kompensieren. In den westeuropäischen Ländern steht Deutschland hinsichtlich seines Verbrauches an tierischen Nahrungsmitteln gegenwärtig noch mit an letzter Stelle, trotzdem sich gegenüber der Zeit vor 1914 in dieser Beziehung bereits ein Umschwung zu vollziehen beginnt. Es braucht an dieser Stelle nicht betont zu werden, welche Bedeutung eine bessere Versorgung gerade der breiten Volksschichten in hygienischer Beziehung besitzt. Es handelt sich also nicht darum, den gegenwärtigen Verbrauch mit den gegenwärtig erreichbaren höchsten Leistungen unseres Viehstapels in Beziehung zu setzen, sondern die Frage zu beantworten, ob letzterer die Möglichkeit eröffnet, auch den *relativ* steigenden Bedarf an tierischen Nahrungsmitteln

im Inlande zu decken. Ob unsere landwirtschaftliche Produktion *insgesamt* eine Einfuhr erübrigen kann, ist eine untergeordnete Frage. Wenn sie auch rein produktionstechnisch zu bejahen ist, so spielen dabei doch wirtschaftliche Momente eine erhebliche Rolle. Die kompliziertere Gliederung unserer ganzen Volkswirtschaft hindert eine ökonomische Erzeugung *aller* Rohstoffe im Verhältnis zum Ausland. Es dürfte beispielsweise kaum gelingen, den Bedarf der Landwirtschaft sowohl wie unmittelbar der konsumierenden Bevölkerung und der Technik an tierischen und mehr noch an pflanzlichen Fetten im Inlande mit der gleichen Wirtschaftlichkeit zur Verfügung zu stellen, wie dies durch die Einfuhr aus ausländischen, primitiveren Wirtschaftsgebieten möglich ist. Daran hat eine hochentwickelte Volkswirtschaft aber auch kein allzu starkes Interesse, denn schließlich entscheidet nicht die quantitative Produktion, sondern die qualitative Produktivität.

2. *Variationserscheinungen.*

Wie schon kurz angedeutet, richtet sich die züchterische Einwirkung auf die Tiere, soweit eine wirtschaftliche Nutzung in Frage kommt, nach zwei Seiten hin. Zunächst bedarf es zu einer Erhöhung oder höchstmöglichen Entfaltung von morphologischen oder physiologischen Merkmalen, welche wirtschaftlich genutzt werden sollen, der Unterstützung durch eine entwicklungsfördernde Aufzucht. Am wenigsten vorgeschritten ist in dieser Beziehung die unmittelbare Beeinflussung des Individuums durch reizfördernde Mittel, d. h. durch die künstliche oder natürliche Steigerung der Intensität des Ablaufs der Lebensverrichtungen im allgemeinen Sinne. Hier muß ein weiterer Fortschritt wissenschaftlicher Errungenschaften abgewartet werden, bevor von der praktischen Anwendung der bisherigen Kenntnisse über Reizwirkungen von Sekreten usw. in der Viehhaltung wirtschaftliche Ergebnisse zu erhoffen sind. Die zweite angedeutete Möglichkeit erstreckt sich auf die Auslese der ihren Anlagen nach wertvollsten Linien innerhalb unserer Haustierrassen. Dazu bedarf es einer genauen Kenntnis der vorhandenen Anlagen und ihres Verhaltens als Gruppen- oder Rassenmerkmale.

Alle neueren Arbeiten aus dem Gebiete der Vererbungskunde seit der Wiederentdeckung der MENDELschen Regeln haben deren allgemeine Geltung in der lebenden Welt gezeigt, wenn in Einzelheiten der alte Rahmen auch zu eng geworden ist. Am wenigsten fortgeschritten sind jedoch trotz ihrer wirtschaftlichen Bedeutung unsere Kenntnisse über die Erbformel der nutzbaren Eigenschaften bei Haustieren. Meist hat sich die Betrachtung auf Farbabzeichen, Hörner usw. beschränkt. Da gerade bei unseren großen Haustieren experimentelle Forschungen praktisch auf sehr große Hindernisse stoßen, gilt es, unsere Kenntnisse auf einem anderen Wege zu erweitern. Zunächst genügt es, wenn wir über die tatsächlichen Verhältnisse eine brauchbare Aufklärung erlangen können.

Sobald wir einzelne Merkmale großer Haustiere biometrisch untersuchen, ergibt sich der Zusammenhang mit den an anderen Tieren und an Pflanzen gewonnenen Ergebnissen von selbst. Zwar läßt sich durch die biometrische Analyse keine Aufklärung über Wesen und Wirksamkeit der Erbfaktoren selbst herbeiführen, wohl aber zeigt sie die Gesetzmäßigkeiten des Verhaltens auch der größeren Haustiere. Dadurch besitzen wir ein Mittel, wenigstens vorläufig die Geltung der Vererbungsgesetze auch bei unseren großen Haustieren zu prüfen. Sowohl die Vererbungsforschung MENDELscher Richtung wie die biometrische Analyse gehen ja von gleichbleibenden Zahlenverhältnissen in den verschiedenen Generationen aus; diese unter sonst gleichbleibenden Voraussetzungen unveränderlichen Zahlenverhältnisse für alle überhaupt meßbaren Eigenschaften bilden in beiden Fällen einen untrüglichen Hinweis auf die Wirksamkeit der Erbfaktoren. Lediglich eine Veränderung des bewirkenden Faktorenapparates vermag nach unseren bisherigen Kenntnissen auch die äußerlich wahrnehmbare Zusammensetzung der einzelnen Generationen zu verändern.

Die in verschiedenen Herd- bzw. Stutbüchern vorhandenen, gewöhnlich bei der Aufnahme in die Herdbücher durchgeführten Messungen an Pferden und Rindern gestatten es, an großen Zahlenreihen die vorstehenden Voraussetzungen zu prüfen. Es handelt sich bei der vorliegenden Betrachtung um mehrere tausend Angaben für jedes einzelne Merkmal, wodurch die biometrische Analyse dieser Merkmale die von der Wahrscheinlichkeitsrechnung geforderten Voraussetzungen hinsichtlich des Umfanges der Zahlenreihen erfüllt.

Die Beurteilung der Zuchttiere ging meist von der äußeren Gestalt aus. So wenig diese Methode den wirklichen Zuchtwert eines Tieres zum Ausdruck bringen kann, läßt sich doch nicht abstreiten, daß auf diesem Wege ein großer Teil der züchterischen Fortschritte wenigstens in technischer Beziehung erreicht worden ist. Welche Grenzen und Lücken die züchterische Beurteilung eines Tieres — und sinnentsprechend lassen sich die Ergebnisse auch auf den Menschen anwenden — aufweist, werden die hier gegebenen Beispiele zeigen. Wir betrachten zunächst das Verhalten einzelner Formenmerkmale bei etwa 2500 schwarzbunten ostpreußischen Kontrollvereinskühen (FEIGE, 1921). Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist die graphische Darstellung gewählt.

Die nachstehende Fig. 1 zeigt deutlich ein annähernd gleichsinniges Verhalten der dargestellten 6 Körpermaße; die Klassenunterschiede betragen in jedem Beispiel 2 cm. Es bedeuten: M = Mittelwert, s = Streuung (Standardabweichung), die für je 1 cm Klassenunterschied berechnet worden sind.

Seit JOHANNSENS grundlegenden Veröffentlichungen und den zahlreichen Arbeiten der eng-

lischen biometrischen Schule (PEARSON u. a.) wissen wir, daß jede Population, wie sie in der untenstehenden Figur dargestellt ist, keine Einheit im genetischen Sinne vorstellt. In jedem derartigen schematisch zusammengestellten Material sind eine ganze Anzahl von „reinen" Linien enthalten, welche den wirklichen Erbwert für sich typisch zum Ausdruck bringen. Demgemäß haben wir auch die in den Kurven der Fig. 1 zur Darstellung gebrachten Populationen, welche sich auf je eine Eigenschaft beziehen, als ein Gemisch einer mehr oder weniger großen Zahl von in sich einheitlichen Linien zu betrachten. Darauf deuten schon die Abweichungen in der Gestaltung der einzelnen Kurven von der theoretisch zu erwartenden Normalkurve hin. In dem vorliegenden Material haben wir auch noch zu berücksichtigen, daß die Eigenschaften der Populationen darin nicht völlig zur Entwicklung gelangen; die Herdbuchauslese bringt es mit sich, daß eine Anzahl von Varianten der niedrigsten Abweichungsklassen ausgefallen ist. Besonders bei der Brustbreite und der Kreuzhöhe sind die Kurven demgemäß auf ihrer linken Seite nicht voll ausgebildet.

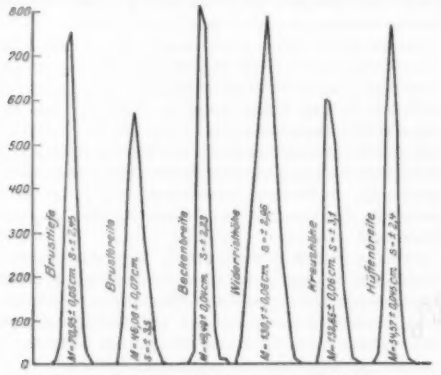

Fig. 1. Körpermaße von 2500 Kühen.
M = Mittelwert, s = Streuung.

Daß es sich in den angegebenen Fällen um gesetzmäßige Erscheinungen, nicht um eine zufällige Massenwirkung handelt, wird deutlich, sobald wir ähnliche Beobachtungen bei anderen Haustierrassen betrachten. Hierüber gibt die graphische Darstellung in Fig. 2 Auskunft.

Auch bei den Fällen der Variationskurven in Fig. 2 erscheint wieder das typische Bild; eine Anhäufung der dem Mittelwert nahestehenden Varianten mit einem mehr oder weniger scharf ausgebildeten Kurvengipfel ist mit einer allmählichen Abnahme der Fälle mit zunehmender Abweichung vom Mittelwert verbunden. Die künstliche Auslese des vorliegenden Herdbuchmaterials macht sich am stärksten wieder bei der Milchmenge bemerkbar.

Auch die in Fig. 2 dargestellten Variationsreihen zeigen durch ihre unregelmäßige Gestaltung, daß wir es durchweg nicht mit einheitlichen Linien, sondern mit Gemischen solcher zu tun haben. Immerhin ist die Unregelmäßigkeit nirgends so groß, wie es bei Linien mit voneinander völlig abweichenden Eigenschaften erwartet werden könnte. Die schon durch zahlreiche Generationen hindurch vorgenommene Auslese der Tiere nach bestimmten Züchtungsgrundsätzen hat bereits zu einer verhältnismäßig starken Ausgleichung des ursprünglich vorhandenen und in der durchschnittlichen Landeszucht auch noch vorwaltenden Gemisches geführt. Gerade die Herdbuchzuchten sind durch die allenthalben viel angewandte Inzucht auf hervorragende männliche,

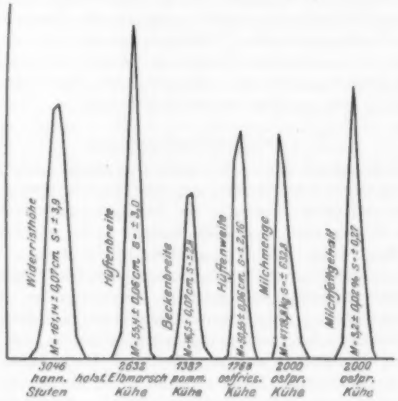

Fig. 2.

seltener weibliche Stammtiere in ihren genetischen Anlagen ziemlich ausgeglichen. Dadurch wird die in Züchterkreisen oft betonte Schwierigkeit, bei getrenntgeschlechtlichen Tieren überhaupt zu „reinen" Linien im Sinne der Pflanzenzucht gelangen zu können, praktisch oft überwunden. Die Stammbaumstudien über den Aufbau unserer wichtigsten Haustierzuchten haben immer wieder bewiesen, daß es gegenwärtig schwierig ist, überhaupt Tiere miteinander zu paaren, welche nicht wenigstens in der 4. oder 5. Ahnengeneration miteinander irgendwelche Blutverknüpfung zeigen. Es handelt sich also um verhältnismäßig wenige Kombinationsmöglichkeiten in genetischer Hinsicht, und daraus erklärt sich auch die starke Übereinstimmung in den Variationskurven für die einzelnen Merkmale bei den dargestellten Haustieren. Die auftretenden Unterschiede bedeuten auch keine tatsächliche Verschiedenheit in den Anlagen, sondern nur die jeweilig wechselnden Anteile der einzelnen Linien am Gesamtbestande. Hinsichtlich ihrer wirtschaftlich bedeutsamen Merkmale weisen unsere Haustierrassen derselben Art mithin auch keine grundsätzlichen genetischen Unterschiede auf, soweit es sich bei den einzelnen Eigenschaften um multiple Faktoren handelt.

3. Merkmalskombinationen und Rassetyp.

Kehren wir nochmals zu den Variationsreihen verschiedener Merkmale von rund 2500 ostpreußischen Kontrollvereinskühen in Fig. 1 zurück, so fällt leicht auf, daß die Variationen der verschiedenen Eigenschaften bei denselben Tieren nicht gleichartig verlaufen. Jede der dargestellten Eigenschaften ist ihrem genetischen Verhalten nach von der anderen unabhängig. Das bedeutet für die züchterische Praxis neben einem Nachteil auch einen Vorteil. Durch die Unabhängigkeit dieser Merkmale voneinander besteht bei jeder Paarung die Gefahr, daß durch die Aufspaltung der betreffenden Erbfaktoren eine Kombination der Merkmale auftritt, welche dem Züchter nicht erwünscht ist. Andererseits entsteht dadurch die Möglichkeit, die verschiedenen Merkmale willkürlich zu kombinieren und je nach den wechselnden wirtschaftlichen Bedürfnissen die typischen Eigenschaften der Tierform als solcher zu verändern.

Die nutzbaren Eigenschaften einer Haustierform werden in den seltensten Fällen durch eine einzelne Anlage bedingt; gewöhnlich beruht der Wert einer Rasse auf einer Vielheit von Anlagen, z. B. Frühreife, Milchergiebigkeit, Größe usw. Wir haben gesehen, daß jede Anlage einer Rasse bzw. einer genealogischen Linie ihr typisches Verhalten zeigt. Sowohl die einzelne Erbanlage als „reine" Linie läßt sich biometrisch nach dem Wahrscheinlichkeitsgesetz zur Darstellung bringen, wie auch die Gesamtheit der einzelnen Anlagen innerhalb einer Rasse. Sobald die untersuchte Tierreihe groß genug ist, stellt sich auch in der Verteilung der einzelnen Anlagen ein Gleichgewicht ein. Es ist also durchaus möglich, nicht nur für die einzelne Erblinie, sondern auch für die Rasse als Gemisch solcher Erblinien ein typisches Verhalten darzustellen. Schon HEINCKE hat nachgewiesen, daß nicht nur die *einzelne* Eigenschaft bei *vielen* Tieren, sondern auch *viele* Eigenschaften bei *einem* Tier der binomialen Verteilung folgen, und er hat dadurch das Mittel für eine exakte Rassendiagnose geliefert.

Wenn wir zunächst die *Rasse* betrachten, so kann diese als Kombination einzelner Merkmalsanlagen bestimmt werden. Da jede Anlage die Eigentümlichkeit besitzt, eine gleichmäßig um den Mittelwert schwankende Verteilungskurve zu bilden, läßt sich aus den einzelnen Mittelwerten für jede Eigenschaft auch die durchschnittliche Kombination, welche für eine Rasse typisch ist, feststellen. Jede Veränderung dieser Kombination durch Einführung von Merkmalen mit anderem typischen Verhalten muß diese durchschnittliche Kombination erschüttern, also den Rassetyp verändern. Da die von uns hier betrachteten Merkmale unabhängig voneinander variieren, ist die Möglichkeit gegeben, sie bei den einzelnen Haustierformen zum Austausch zu bringen. Tatsächlich ist auch die Bildung der meisten modernen Leistungsrassen unserer Haustiere zunächst durch Kreuzungen erfolgt, um verschiedene wertvolle Anlagen mehrerer Rassen in einer Form zu kombinieren; erst sekundär suchte man durch Auslese und teilweise sehr starke Inzucht die gewonnenen Ergebnisse zu sichern. Die alten Unterscheidungen zwischen Primitiv- und Kultur- bzw. Land- und Züchtungsrasse haben also eine gewisse Berechtigung für sich insofern, als durch diese Kreuzungen Merkmalskombinationen entstanden sind, welche ursprünglich in der freien Natur nicht vorhanden waren. Die stärksten Wirkungen, manchmal bis zur Spielerei, sind in dieser Beziehung beim Haushund, Kaninchen und Huhn zu verspüren.

Vergleichen wir das Verhalten mehrerer Generationen miteinander, so zeigt sich auch bei Wahl extremer Varianten der Ausgangsgenerationen immer das Bestreben, zu dem allgemeinen (durchschnittlichen) Rassestandard zurückzukehren. Die *Auslese nach allgemeinen Rasseeigenschaften bleibt auch bei den Haustieren wirkungslos.* Ein Fortschritt im Sinne einer qualitativen oder quantitativen Erhöhung der Leistungen darf nie von den Rasseeigenschaften ausgehen, welche ja Kombinationen verschiedener Anlagen vorstellen. Es bedarf in jedem Falle zunächst einer Trennung des Rassegemisches, die Umzüchtung muß in Anlehnung an eine Erbeinheit erfolgen. Daraus ergibt sich auch in wirtschaftlicher Hinsicht die große Bedeutung einer genauen Analyse unserer Haustierzuchten, für die bisher noch sehr wenig getan worden ist. Solange Mutationen nicht willkürlich erzeugt werden können, bildet die Trennung der Liniengemische in jeder Rasse das wichtigste Hilfsmittel einer Leistungssteigerung. Es handelt sich darum, durch eine Ermittelung der über den gegenwärtigen Durchschnitten der ganzen Rasse stehenden Linien eine dauernde Steigerung der Nutzungsfähigkeit durchzuführen. Über die wirtschaftliche Bedeutung solcher Arbeiten geben unsere Ausführungen im ersten Abschnitt ein Bild.

Wir haben bisher die einzelnen Merkmale immer nur als Eigentümlichkeit der ganzen Individuengruppe betrachtet. Wie aber schon angedeutet wurde, lassen sich dieselben Regeln, welche das Einzelmerkmal bei vielen Tieren folgt, auch auf alle Merkmale des Einzeltieres anwenden (HEINCKE). Sämtliche Eigenschaften bilden als Gesamtheit mithin ihrerseits wieder eine einheitliche „Linie", welche jetzt in Beziehung zum Individuum gebracht werden kann. Es bedarf keines ausführlichen Nachweises, daß eine Charakteristik auf dieser Grundlage für die züchterische Praxis ungleich wertvoller ist als die gesonderte Betrachtung der einzelnen Merkmale, die im Erbgang voneinander unabhängig sind. Das Maß der Abweichungen der individuellen Eigenschaften von der durchschnittlichen Merkmalskombination der ganzen Gruppe gestattet ohne weiteres eine Beurteilung, ob das Individuum hinsichtlich seines Verhaltens zu ihr als „typisch" zu bezeichnen ist oder einen Sonderfall vorstellt. Da die äußerlich sichtbaren oder feststellbaren Merkmale die ge-

netische Konstitution der Tiere verdeutlichen, sind hierdurch Hinweise auf Veränderungen des im Keimplasma lokalisierten Faktorengemisches gegeben.

4. Beziehungen zwischen physiologischen und morphologischen Charakteren.

Noch in der Gegenwart ist bei vielen Züchtern der Glaube verbreitet, daß bestimmte physiologische Leistungen, besonders die Milchergiebigkeit bei Kühen, mit einer bestimmten Ausbildung äußerer Körpermerkmale verknüpft sei. Man hat in dem Bestreben, die Leistungsfähigkeit der Tiere aus dem äußeren Augenschein beurteilen zu können, Beziehungen zu allen möglichen Merkmalen aufzustellen gesucht: feinen Gliederbau, Größe des Euters, Haarstärke, Gestalt des Kopfes, „Milchspiegel" usw. Soweit eine exakte Nachprüfung erfolgt ist, haben sich unverkennbare Zusammenhänge aber nicht ergeben. In keinem Falle konnte die Milchleistung mit irgendwelchen Formcharakteren in einen gesetzmäßigen Zusammenhang gebracht werden. Ein Teil der Untersuchungen, auf die hier nicht einzeln eingegangen werden soll, hatte sogar gegenüber anderen widersprechende Ergebnisse.

Den hartnäckigen Glauben mancher Züchter vermögen wir jetzt auf seine tatsächlichen Grundlagen zurückzuführen. Er ist durch eine falsche Deutung an sich richtiger Beobachtungen entstanden. Da die einzelnen äußeren Merkmale unabhängig voneinander variieren, können zwischen ihnen auch keine echten Korrelationen im biologischen Sinne bestehen. Ebensowenig ist dies zwischen einzelnen äußeren Merkmalen und der Milchleistung der Fall. Die Milchleistung verhält sich hinsichtlich ihrer Variabilität wie jeder Formcharakter (vgl. Fig. 2). Trotzdem besteht eine Möglichkeit, daß zwei oder mehr Merkmale bei Tieren eines Herdenbestandes ein gleiches genetisches Verhalten aufweisen und dadurch eine feste Verknüpfung vortäuschen. Gewöhnlich handelt es sich dann auch um die Nachkommenschaft eines und desselben Tieres, die in mehreren Merkmalen übereinstimmt.

Solche zufälligen Übereinstimmungen einzelner Merkmale verschwinden, sobald bei genügend großen Untersuchungsreihen die einzelnen Merkmale in ihrem natürlichen Verhalten voll erfaßt werden können. Obwohl selbst dann durch das Überwiegen von Linien mit einzelnen gleichbleibenden Eigenschaften eine schwache Korrelation hervorgerufen werden kann, sind die Ergebnisse doch negativ geblieben. Selbst zwei so nahe zusammenhängende Merkmale, wie *Menge* und *Fettgehalt* der Milch, weisen keine unmittelbaren Beziehungen zueinander auf; da der Fettgehalt der Milch bei gleichbleibenden äußeren Verhältnissen normal konstant bleibt, können geringe Schwankungen nur durch die stärker wechselnde Milchmenge hervorgerufen werden. Bei 2000 ostpreußischen Kontrollvereinskühen, deren Variationskurven sich in Fig. 2 vorfinden, betrug der Korrelationskoeffizient für die Beziehung zwischen Menge und Fettgehalt des Milch, nach Bravais' Formel berechnet, $r = 0{,}32$. — Das bedeutet also, daß bei großen Beständen ein steigender Betrag an Milchmenge eine gewisse Abnahme des relativen Fettgehaltes nach sich zieht. Die Ursache dieser Beziehung ist eine rein physikalische Erscheinung.

Trotzdem theoretisch eine Beziehung zwischen der optimalen Ausbildung der einzelnen Formbestandteile des Tierkörpers und den Leistungen vorhanden sein *muß*, gelingt es auch nicht, zwischen einer großen Anzahl von Eigenschaften derselben Individuen und bestimmten Leistungen statistische Korrelationen zu ermitteln. Es besteht mithin auch kein äußerlich wahrnehmbarer Zusammenhang zwischen dem Erscheinungstyp der Tiere und ihren Leistungen. Bei etwa 700 ostfriesischen Kontrollvereinskühen wurde zwischen 35 Merkmalen einerseits und der Milchleistung andererseits eine Korrelation von — 0,05 berechnet. Hier fehlt praktisch also jeder Zusammenhang. Nicht der Formwert einzelner Organe ist für die Leistungen, d. h. den ungestörten Ablauf der Lebensverrichtungen, maßgebend, sondern das reibungslose Zusammenwirken *aller* Bestandteile des Organismus, sowohl der morphologisch wie der physiologisch wirksamen, im Verhältnis zu seiner Umwelt.

Literatur:

E. Feige, Variationsstatistische Untersuchungen an Haustieren. Fühlings landw. Zeitung 70/71. Stuttgart 1921/22.
W. Johannsen, Über Erblichkeit in Populationen und in reinen Linien. Jena 1903.
F. Heincke, Naturgeschichte des Herings. Abhandl. d. dtsch. Seefischerei-Ver. 1897/98.

Zuschriften.

Der Herausgeber bittet, die *Zuschriften* auf einen Umfang von *höchstens* einer Druckspalte zu beschränken, bei längeren Mitteilungen muß der Verfasser mit Ablehnung oder mit Veröffentlichung nach längerer Zeit rechnen.
Für die Zuschriften hält sich der Herausgeber nicht für verantwortlich.

Selbstdiffusion und Rekrystallisation.

Die Ansicht, *daß die vollkommensten wirklichen Krystalle konstitutionelle Abweichungen vom idealen Gitterbau — Lockerstellen — besitzen*, welche u. a. für die *Festigkeitseigenschaften* maßgebend sind[1], führte zu der Folgerung, daß das *Ionenleitvermögen* von krystallisierten Verbindungen — Einkrystallen wie Krystallaggregaten — auf *zweierlei* Arten thermisch ablösbarer Ionen zurückzuführen ist. Die von den Lockerstellen herrührenden *Lockerionen* sind leichter ablösbar und bewirken das Leitvermögen bei *tieferen* Temperaturen, die weitaus zahlreicheren *Gitterionen* stammen aus den ideal gebauten Krystallteilen und werden erst bei

[1] Siehe etwa A. Smekal, Phys. Zeitschr. **26**, 707. 1925; **27**, 837. 1926.

größerer *Annäherung an den Schmelzpunkt* im elektrolytischen Strome vorherrschend. Die quantitative Übereinstimmung dieser Folgerungen mit der Erfahrung[1] erlaubt in jedem Einzelfalle zu entscheiden, welche von den beiden Ionensorten bei gegebener Temperaturlage für die molekularen Bewegungsvorgänge kennzeichnend ist. Aus dem nahen, kürzlich von JOST näher geprüften *Zusammenhang zwischen Ionenleitung und Selbstdiffusionsvermögen*[2] folgt, daß diese Entscheidung ohne weiteres auch für die Diffusionsvorgänge in Festkörpern verbindlich ist. Ganz ähnliche Beziehungen wie bei der Diffusion in festen Ionenleitern sind aus naheliegenden Analogiegründen auch für die Diffusion ungeladener Teilchen in festen Nicht-Ionenleitern, z. B. den *Metallen*, vorauszusehen und in ausreichend untersuchten Einzelfällen auch tatsächlich zu bestätigen.

Die Anwendung des so gewonnenen Kriteriums auf die Untersuchungen TAMMANNS über das *Zusammenbacken mechanisch gerührter Krystallpulver*[3] ergibt ausnahmslos, daß die gefundenen Temperatur-Schwellenwerte mehrere hundert Grade *unterhalb* eines merklichen Einflusses der Gitterbausteine gelegen sind. Ein „Beginn merklichen Platzwechsels der Atome im Krystallgitter" (TAMMANN) liegt demnach *nicht* vor, sondern — wie verständlich — nur ein Verschweißen der Krystallkörnchen mittels der längs ihrer *Oberflächen* beweglichen *Lockerionen*. Ähnliches gilt für die hauptsächlich von HEDVALL und TAMMANN untersuchten *Reaktionen zwischen pulverförmigen festen Phasen*; die von HEDVALL zuletzt untersuchten Reaktionen mit Kuprohalogeniden[4] zeigen überdies, daß die Temperaturen merklichen Reaktionsbeginnes weniger durch die *Anzahl* als durch die Oberflächen*beweglichkeit* der wanderungsfähigen Lockerionen bestimmt werden.

Die *Temperaturlage der Rekrystallisationserscheinungen* lehrt schließlich, daß auch bei den hier auftretenden molekularen Ortsveränderungen *nur im „Lockerzustande" befindliche Bausteine der Krystallsubstanz* eine wesentliche Rolle spielen können. Während alle bisherigen Verfestigungstheorien hier das Gegenteil erwarten lassen müßten, ist dieses Ergebnis auf Grund des vom Verfasser angegebenen Mechanismus plastischer Verformung und Verfestigung unmittelbar vorauszusehen. Wie auch durch besondere *Experimente* dargetan worden war[5], *ist die plastische Verformung an das Vorhandensein der Lockerstellen gebunden*, welche hierbei an Zahl oder Umfang zunehmen. Das optisch nachgewiesene, *auf amikroskopische Umgebungen der Lockerstellen beschränkte Auftreten elastischer Gitter-Höchstspannungen* bewirkt eine unter vergleichbaren Umständen auch anderweitig belegbare[6] *Herabsetzung* der zur thermischen Abtrennung von Lockerbausteinen erforderlichen *Energieschwellen* und damit eine erhebliche *Zunahme des Selbstdiffusionsvermögens der Lockerbausteine*. Die *Inhomogenität* der vorhandenen Spannungsverteilung bewirkt, daß abgetrennte Lockerbausteine an weniger gespannten Lockerstellenteilen zu stabilerer Anlagerung gelangen können. Wird die Temperatur soweit gesteigert, daß die Anzahl der abgetrennten Lockerbausteine zum wenigstens teilweisen *Abbau der genannten Höchstspannungen* ausreicht, dann muß die *Verfestigung abnehmen* und merkliche Neubildung weniger stark gestörter Krystallgittergebiete eintreten. Es erübrigt sich, an dieser Stelle besonders nachzuweisen, daß die von VAN ARKEL kürzlich aus sehr reizvollen Versuchen abgeleiteten feineren Rekrystallisationsgesetze[1] mit dem hier angedeuteten *Mechanismus der Rekrystallisationsvorgänge* in vollem Einklang stehen. *Die Rekrystallisation erscheint demnach als ein Stabilisierungsvorgang, welcher mit den Lockerstellen der Realkrystalle und den von ihnen bewirkten Spannungsinhomogenitäten im verformten Krystallkorn ursächlich zu verknüpfen ist.* Versuche, das erhöhte Diffusionsvermögen in *rekrystallisierenden* Ionenleitern durch Messung ihres *elektrischen Leitvermögens* genauer zu verfolgen, befinden sich in Vorbereitung.

Wien, den 5. März 1928. ADOLF SMEKAL.

[1] A. SMEKAL, Zeitschr. f. techn. Phys. **8**, 561. 1927.
[2] W. JOST, Diss. Halle 1926 (C. TUBANDT).
[3] G. TAMMANN, Zeitschr. f. anorg. Chem. **149**, 21. 1925 (Diss. E. KORDES).
[4] J. A. HEDVALL, Svensk. Kemisk Tidskr. **39**, 280. 1927.
[5] A. SMEKAL, Wien. Anz. 1927, S. 22, 46; Vortrag am Volta-Kongreß 1927.
[6] Z. B. durch den Unterschied in der Temperaturabhängigkeit des Ionenleitvermögens gespannter und ungespannter Gläser, oder durch den Einfluß hoher elektrischer Felder auf das Leitvermögen u. a. m.

Irrtümliche Bestimmung des Zellulose-Raumgitters[2].

Bei dem Versuch, das von R. O. HERZOG ermittelte Cellulosegitter (Journ. phys. chem. **30**, 455. 1926) mit dem vom Verf. gefundenen (Journ. of gen. physiol. **9** [2], 221. 1926; **9** [5], 677. 1926 und Coll. Symp. Monogr. **4**, 174. 1926) in Übereinstimmung zu bringen, ergaben sich einige Irrtümer, die sich weder aus Fehlern der Apparatur noch durch falsche Messungen erklären lassen. Eine genauere Prüfung machte augenscheinlich, daß einige Interferenzflecken, die von HERZOG einbezogen werden, β-Punkte sind und er unglücklicherweise einen davon für die α-Achse und den entsprechenden K_α-Wert für die b-Achse der Elementarzelle benutzt. Das hat zur Folge, daß eine Anzahl seiner Schlußfolgerungen jede Bedeutung verlieren: 1. Das Achsenverhältnis muß natürlich geändert werden. 2. Es fehlt die Begründung dafür, daß die Zelle 4 Dextrosereste enthält. 3. Die Annahme, daß das Beugungsgitter auf Beimengungen hinweist und daß zwei Polysaccharide in der Faser enthalten sind, verliert die Grundlage. 4. Der Vergleich zwischen den Interferenzen der mercerisierten und nichtmercerisierten Faser ist belanglos. Auf jeden Fall müssen viele Schlußfolgerungen aufgegeben werden. Eingehender ist diese Richtigstellung in NATURE **120**, Nr. 3030 vom 26. November 1927 erfolgt.

Los Angeles, Kalifornien, Universität.
O. L. SPONSLER.

Zur Klärung der oben von Herrn SPONSLER aufgeworfenen Fragen sei einiges davon mitgeteilt, was ich zur Deutung der Celluloseaufnahme verwendet habe,

[1] A. E. VAN ARKEL, Zeitschr. f. Phys. **41**, 701. 1927; **42**, 795. 1927.
[2] Übersetzt von R. O. HERZOG, Dahlem.

Bemerkung des Übersetzers: Der Herr Herausgeber hatte die große Freundlichkeit, mir die vorstehende Notiz zur Kenntnis zu geben. Ich habe mich gern bereit erklärt, sie zu übersetzen und Herrn M. POLANYI zu übermitteln, weil die Diskussion des Cellulosediagramms, auf die sich Herr SPONSLER bezieht, von Herrn POLANYI im Jahre 1920 gegeben und von mir stets auch nur unter *seinem* Namen zitiert worden ist. H.

die mir von den Herren R. O. Herzog und W. Jancke im Jahre 1920 überlassen worden sind:

1. Die Diagramme der nativen sowie der mercerisierten Cellulose enthalten das gleiche System von etwa 20 Interferenzflecken (in jedem Quadranten), welche aus derselben rhombisch-quadratischen Form mit den Achsen $a = 8{,}45 \cdot 10^{-8}$ cm; $b = 7{,}9 \cdot 10^{-8}$ cm; $c = 10{,}2 \cdot 10^{-8}$ cm. berechnet werden können.

2. Außerdem enthalten die Diagramme noch einige Interferenzen, die nicht in diese quadratische Form passen. Diese sind sämtlich entweder auf dem Äquator gelegen oder in der vertikalen Mittellinie.

a) Für die letzteren Interferenzen gibt es im Sinne der heutigen Strukturlehre die nächstliegende Erklärung daß sie nicht von der Cellulose (sondern von einer zweiten Substanz oder Modifikation) herrühren, weil die in Richtung der Faserachse gelegene Identitätsperiode durch die Aufnahme von neuen Schichtlinien völlig gesichert erscheint.

b) Das führte zur Annahme, daß auch die am Äquator liegenden, nicht in das System passenden Interferenzen nicht zum System gehören. Diese Annahme wird bestätigt beim Vergleich der nativen und der mercerisierten Cellulose. Bei der nativen Cellulose ist *ein* anomaler Fleck vorhanden, bei der Mercerisierung tritt eine Verschiebung und Aufspaltung dieses Fleckes ein, ohne daß im übrigen System der Interferenzen eine dementsprechende Änderung eintritt.

3. Bei der Mercerisierung tritt eine Intensitätsänderung im System der Celluloseinterferenzen ein, wobei (unter anderem) die beiden Flecken der nativen Cellulose, von denen Sponsler die schwächere als K_β-Linie deutet, *gleiche* Intensität gewinnen. Dadurch ist gesichert, daß beide Flecken bei der mercerisierten Cellulose reell sind.

4. Es kann sein, daß der fragliche Interferenzfleck bei der nativen Cellulose nicht reell ist, jedoch kann ich dem für die Deutung des Diagramms überhaupt keine Bedeutung beimessen, erstens wegen des unter 3 (und 1) Gesagten, zweitens weil der Wegfall einer Linie die Gültigkeit einer quadratischen Form nicht beeinflußt, wenn es nicht gelingt, das Diagramm dadurch mit einem *kleineren* Elementarkörper zu deuten. Das ist aber bei der Cellulose unmöglich. (Z. B. wegen der Interferenzen [101], [103], [105].)

Im übrigen sei bemerkt, daß die Deutung von Sponsler[1], auf die er in seiner Mitteilung in Nature noch besonders hinweist, unmöglich ist, weil sie der geometrischen Strukturtheorie widerspricht. (Ein orthorhombischer Elementarkörper kann nicht aus zwei Molekülen ohne Eigensymmetrie bestehen.) Auch bei Annahme einer Pseudosymmetrie kommt man mit den Sponslerschen Achsen nicht aus, wie man aus dem Schlußsatz von Punkt 4 ersieht.

Berlin-Dahlem, den 13. März 1928. M. Polanyi.

[1] Journ. of gen. physiol. 9, 694. 1926.

Besprechungen.

EMDEN, R., **Thermodynamik der Himmelskörper.** Enzyklopädie der Mathematischen Wissenschaften VI_9. 24. Leipzig: B. G. Teubner 1926. S. 373-532. 16 × 24 cm. Preis RM 6.40.

In diesem Beitrag zur Enzykl. der math. Wiss. werden zum ersten Male die Resultate eines Forschungsgebietes zusammengestellt, das bei der Gründung des Unternehmens eigentlich noch nicht bestand oder wenigstens nicht entfernt die Bedeutung hatte, die ihm heute zukommt. Der Verfasser ist an der Grundlegung dieses Forschungsgebietes mit seinem Werke „Gaskugeln" bestimmend beteiligt gewesen. Heute stehen durch die Untersuchungen von Eddington, Jeans, Milne über den Aufbau der Sterne als Gaskugeln diese Fragen im Mittelpunkt des Interesses der Astrophysik, und greifen überall auf Resultate zurück, zu denen R. Emden den Boden bereitet hatte. Den wesentlichsten Impuls hat dieses Forschungsgebiet jedoch erhalten, als die rein thermodynamische Behandlungsweise des Verfassers durch Einbeziehung der Strahlungstheorie und schließlich durch Anschluß an die Quantentheorie und Atomphysik erweitert wurde. Dementsprechend gliedert sich das Buch Emdens in drei Abschnitte, diesen drei Phasen der Entwicklung entsprechend. Nach einem mehr einleitenden Kapitel wird der Aufbau eines Himmelskörpers unter Berücksichtigung der thermischen Energie und der Gravitationsenergie behandelt. Er enthält das ureigenste Arbeitsgebiet Emdens, die Theorie der polytropen Gaskugeln, der polytropen Atmosphären mit allen den Fragen, die zugleich einen astronomischen Ausblick gewähren, wie die Frage des Energiegewinnes einer sich kontrahierenden Gaskugel, die Theorie kosmischer Staubmassen, der Sternhaufen usw. In dem folgenden Abschnitt tritt zu der thermischen und Gravitationsernergie noch die Strahlungsenergie hinzu; es wird also bei dem Aufbau der Gaskugel der Einfluß des Strahlungsdruckes berücksichtigt. Dieser Gesichtspunkt kennzeichnet das Eingreifen Eddingtons in dieses Arbeitsgebiet. Die bis dahin noch ungeklärte Frage, nach welcher polytropen Klasse ein Stern als Gaskugel aufzubauen sei, wird dahin beantwortet, daß für das Innere des Sternes der Aufbau nach einer adiabatischen Gaskugel der Klasse $n = 3$ zu erfolgen hat, wenn das von Schwarzschild in die Astrophysik eingeführte Prinzip des Energietransportes durch das Strahlungsfeld, das sog. Strahlungsgleichgewicht, benutzt wird. Die Theorie eines nach dieser Adiabaten aufgebauten Gaskugel lag von dem Verfasser ausgearbeitet vor. Die in diesem Abschnitt behandelten Probleme stellen den wesentlichsten Fortschritt der theoretischen Astrophysik in letzter Zeit dar. Die bisher gewonnenen Resultate sind allerdings zum größten Teile noch nicht abschließend, insbesondere ist die Frage der Energieerzeugung im Innern der Sterne noch völlig ungeklärt und die Diskussion des Absorptionskoeffizienten der Sternmaterie führt auf noch nicht aufgelöste Schwierigkeiten. Diese werden erst zu überwinden sein, wenn diese Probleme mit den Erkenntnissen der Quantentheorie und Atomphysik in Angriff genommen werden können. Bisher ist das nur für die Erscheinungen in den Spektren der Sterne durch die Ansätze Megh Nad Saha's, möglich gewesen. Diese Untersuchungen werden im letzten Abschnitt behandelt, zugleich mit ihrem weiteren Ausbau durch Fowler und Milne. Auch die letzten Ansätze Milnes über das Gleichgewicht in den äußersten Schichten leuchtender Atmosphären finden Berücksichtigung.

Es ist unmöglich, im Rahmen einer Besprechung auf alle die Fragen einzugehen, die der Verfasser in seinem Buche berührt. Der Charakter als Enzyklopädieartikel bringt es mit sich, daß der Verfasser in aller Kürze alles heranzieht, was auf dem behandelten Forschungsgebiete bisher gearbeitet worden ist und die entsprechende Literatur mitteilt. Dadurch gewinnt dieser Artikel für alle, die auf diesem Gebiete

arbeiten, einen besonderen Wert. Da überdies eine zusammenfassende Darstellung dieses ganzen Forschungsgebietes noch gefehlt hat und aus erfahrenerer Feder zur Zeit kaum fließen könnte, so stellt dieses Buch für alle Physiker und Astrophysiker eine Erscheinung von größter Bedeutung dar.

E. Freundlich, Berlin-Potsdam.

Cranz, C., Lehrbuch der Ballistik. Bd. III: Experimentelle Ballistik. 2. Aufl. Unter Mitwirkung von O. von Eberhard und K. Becker. Berlin: Julius Springer 1927. XII, 408 S. und 138 Abbildungen im Text sowie 56 Abbildungen im Anhang. 16×24 cm. Preis geb. RM 39.—.

Als dritter und letzter Band des klassischen Lehrbuches der Ballistik von Cranz liegt jetzt die „Experimentelle Ballistik" in 2. Auflage vor, nachdem 1925 Band I „Äußere Ballistik" und 1926 Band II „Innere Ballistik" erschienen waren, welche in den Naturwissenschaften 1926, H. 34, S. 789 und 1928, H. 5, S. 80 bereits besprochen wurden. Während der Verfasser also in den zwei ersten Bänden im wesentlichen die Bewegung des Geschosses innerhalb und außerhalb des Rohres aus den allgemeinen Naturgesetzen theoretisch bis zum Zahlenergebnis herleitet, behandelt er im jetzt vorliegenden Band III die Meßverfahren und Meßgeräte sowie deren Handhabung zur Ermittelung all der Versuchsergebnisse, welche die Grundlage jener früheren theoretischen Ansätze waren, und ferner auch der Versuchsergebnisse, die es ermöglichen, die Richtigkeit oder Genauigkeit der Rechnung durch die Erfahrung nachzuprüfen.

Die Mannigfaltigkeit und das Ineinandergreifen der vielen Erscheinungen beim Schießen zwingen den Ballistiker, Beobachtungs- und Meßverfahren aus den meisten Fachgebieten der Naturwissenschaften heranzuziehen und für seine Zwecke auszubilden. Schon eine Durchsicht des Inhaltsverzeichnisses von Band III gibt dem Leser eine Vorstellung von dem Ausmaß der hier zu bewältigenden Aufgaben der Meßtechnik.

Nach einem Überblick über die mathematischen und physikalischen Hilfsgeräte und Verfahren, unter denen die Anweisungen über das Arbeiten mit dem bekannten Integraphen von Abdank-Abakanowicz und über graphisches Differentiieren recht lehrreich sind, folgen einige Kapitel über die Messung von Geschoßgeschwindigkeiten sowie über Geschoßflugzeiten. Hierbei werden unter anderem behandelt: das ballistische Pendel zur Messung der augenblicklichen Geschoßgeschwindigkeit und die verschiedenen mechanischen, elektrischen und optischen Arten der Wegzeitmeßgeräte zur Bestimmung der mittleren Geschwindigkeit aus dem Quotienten: Weg durch Zeit. Dem schließt sich die Prüfung der gebräuchlichen ballistischen Chronographen auf ihre Genauigkeit an und weiter ein Abschnitt von K. Becker über Richten und Richtmittel. Es folgen: die Bestimmung des Abgangswinkels der Geschosse ausschließlich der Störungen, ferner die grundlegenden Untersuchungsverfahren zur Bestimmung der Verbrennungseigenschaften einer Pulversorte sowie zur Ermittelung des Höchstwertes und des Verlaufes des Pulvergasdruckes in der Schußwaffe, vornehmlich durch Stauchgeräte.

Der letzte Abschnitt umfaßt die in der Ballistik ausgebildeten photographischen Verfahren, einschließlich der photogrammetrischen, letztere bearbeitet von K. Becker. Cranz hat es hier bei den photographischen Meßverfahren durch die meisterhafte Ausbildung und Anwendung des Funkenkinematographen erreicht, daß selbst sehr schnellverlaufende ballistische Vorgänge durch Reihenaufnahmen bis zu 100000 Bildern in der Sekunde in allen Einzelheiten verfolgt werden können. Ein beredtes Zeugnis über die hervorragenden Leistungen des Ballistikers Cranz auch auf diesem Gebiete geben die schönen und die Anschauung so außerordentlich fördernden photographischen Abbildungen des Anhanges mit den zugehörigen Erläuterungen. Ein besonderes Interesse werden beim Fachmann, beim Aerodynamiker und bei jedem Naturwissenschaftler die Aufnahmen 19—25 und 37—39 erwecken, die wesentlich zur Aufklärung der Luftdichte- und Luftdruckverhältnisse in den Kopf- und Schwanzwellen fliegender Geschosse beitragen.

Jetzt nach Vollendung dieses Lebenswerkes, das sich wegen des dargebotenen klaren und abgerundeten Bildes der gesamten theoretischen und experimentellen Ballistik der Gegenwart von selbst empfiehlt, sei dem Verfasser und seinen Mitarbeitern Dank ausgesprochen. Cranz hat durch die Niederlegung seiner reichen Erfahrungen uns Deutschen ein weites Wissenschaftsgebiet erhalten, das für die angewandte Physik und für viele Gebiete der wissenschaftlichen und industriellen Technik überaus fruchtbar ist. Zugleich aber hat er mit seinem Werk — trotz ungünstigster äußerer Verhältnisse — überhaupt erst die Möglichkeit geschaffen, die Forschung in der Ballistik für die Zukunft auf wohlvorbereiteten Bahnen fortzusetzen.

M. Weber, Berlin.

Werkstoffhandbuch. Nichteisenmetalle. Herausgegeben von der Deutschen Gesellschaft für Metallkunde im Verein deutscher Ingenieure. Schriftleitung: G. Masing, W. Wunder, H. Groeck. Berlin: Beuth-Verlag G. m. b. H. 1927. 370 S. 17 × 22 cm. Preis RM 24.—.

Um dem imposanten, aber vergänglichen Eindruck der in Berlin im vergangenen Herbst stattgehabten Werkstoffschau einen bleibenden Nachhall zu sichern, hat die Deutsche Gesellschaft für Metallkunde es unternommen, in einem Buche all das zusammenzustellen, was bei dieser Gelegenheit über Eigenschaften und Verhalten der Nichteisenmetalle und ihrer Legierungen der Öffentlichkeit zugänglich gemacht worden ist.

Es entstand auf diese Weise unter der Mitarbeit vieler Spezialfachleute ein Handbuch, dem der Leser nun in bequemer Weise so gut wie alle bekannten Angaben über handelsübliche Metalle und Legierungen entnehmen kann. Wenn man bedenkt, daß die hier zusammengestellten Daten teilweise wohl überhaupt noch nicht veröffentlicht, jedenfalls bei der vorhandenen Fülle von Zeitschriften und Büchern sehr verstreut nur vorlagen, so wird man die Zweckmäßigkeit und den Nutzen einer solchen übersichtlich und knapp gehaltenen Sammlung erkennen und der Gesellschaft und besonders den Herausgebern Dank dafür wissen.

Die Technologie der Legierungen befindet sich augenblicklich infolge der vielen Spezialanforderungen, die die Industrie an ihre Werkstoffe stellt, im Stadium einer lebhaften Entwicklung. Täglich tauchen neue Kompositionen auf, und besonders auf dem Felde der Leichtmetalle ist alles noch stark im Fluß. So liegt die Gefahr vor, daß das Buch schnell veraltet oder wenigstens unvollständig wird. Um dem zu entgehen, wurde ein origineller Ausweg gefunden, man gab dem Werk die Ringbuchform; so kann jederzeit Neues hinzukommen, Veraltetes ausgemerzt werden, eine sehr zu begrüßende Einrichtung, der man weitere Verbreitung wünschen möchte.

Daß eine solche Neuerung auch die Fehler ihrer Tugenden hat, ist natürlich. Die Darstellung muß etwas an Einheitlichkeit verlieren. Wenn auch die Organisation eine recht straffe war, die Individualität der einzelnen Verfasser blieb — meist nicht zum Nach-

teil des Ganzen — bemerkbar, und so ist bisweilen manches breiter, vieles knapper behandelt worden, als man vielleicht wünschen möchte. Das gilt weniger von den einzelnen Abschnitten, die sich mit speziellen Metallen beschäftigen, als vielmehr von den allgemeinen Darlegungen, die das Buch einleiten und beschließen. — Auf 6 Seiten läßt sich die Konstitutionslehre eben doch nicht entwickeln. Die zwei Beispiele, die im Blatt Gewichtsanalyse, und die wenigen, die bei Maßanalyse sich finden, können das Gebiet kaum andeuten, und ebenso geht es mit den Röntgenstrahlenuntersuchungen, um nur wenige Beispiele herauszugreifen. Wenn man erwägt, daß gerade auch diese Kapitel von den besten Kennern geschrieben wurden, und anerkennen muß, wie diese sich bemüht haben, ihrer Aufgabe gerecht zu werden, so wird man vielleicht zu dem Schluß kommen können, daß es am besten gewesen wäre, diese allgemeinen Abschnitte ganz fallen zu lassen, obwohl man andererseits es wieder verstehen kann, daß die Herausgeber sich zu diesem Entschluß doch nicht durchringen konnten.

Wenn über Aluminiumlegierungen 29, über Zinn, Blei, Zink und Cadmium zusammen dagegen nur 10 Abschnitte vorhanden sind, so gibt das ein anschauliches Bild von der mehr oder minder großen Vielgestaltigkeit der einzelnen Typen.

Die Gliederung des Ganzen und sein Inhalt ist aus folgender Zusammenstellung zu erkennen: Allgemeiner Teil 5 Aufsätze, Prüfung der Metalle 32, Kupfer 13, Messing 15, Bronze und Rotguß 11, Aluminium 29, Magnesium 6, Zinn, Blei, Zink 11, Nickel, Mangan, Chrom 12, Edelmetalle 7, sonstige Metalle und Legierungen 8, Stoffe für besondere Verwendung und technologische Vorgänge 15 Aufsätze, Anhang: Normenblätter.

Es steht für den Referenten außer Frage, daß das Werkstoffhandbuch die ihm gebührende weiteste Verbreitung finden, bald auf dem Schreibtisch jedes Metallfachmannes liegen und ihm ebenso unentbehrlich wie dem Ingenieur die „Hütte" sein wird.

W. Fraenkel, Frankfurt a. M.

GUTENBERG, B., **Grundlagen der Erdbebenkunde.** (Sammlung Borntraeger Bd. 12.) Berlin: Gebr. Borntraeger 1927. 189 S., 84 Abbildungen und 1 Tafel. 15 × 23 cm. Preis RM 6.60.

In dem vorliegenden Buch wird als eine erste Einführung in die Erdbebenforschung eine sehr zu begrüßende einfach gehaltene gedrängte Gesamtübersicht ihrer Grundlagen geboten, zu deren Abfassung der Verfasser neuerdings noch durch die Herausgabe seines großen Lehrbuches der Geophysik (Gebr. Borntraeger, Berlin 1926/27) als besonders berufen bezeichnet werden muß.

Obwohl es nun wohl im Wesen einer jeden derartigen wissenschaftlichen Darstellung liegt, daß auch sie nur dem tiefer mit dem behandelten Stoff Vertrauten alles zu bieten vermag, was in sie unter Abstoßung der den Gesamtüberblick erschwerenden Einzelheiten hineingearbeitet worden ist, so hat Referent indessen durchaus den Eindruck gewonnen, daß das Buch sehr geeignet ist, dem Jünger der Seismologie eine gute Orientierung über deren mannigfache Arbeitsgebiete mit ihren Methoden, Problemen und bisherigen Resultaten zu verschaffen. Die Darlegungen zeichnen sich durchweg durch große Klarheit bzw. Anschaulichkeit aus, und zwar namentlich dort, wo es sich um die Herausstellung mehr prinzipieller Fragen und allgemeinerer Gesichtspunkte handelt, für welche Formeln zurücktreten. Besonders hingewiesen sei auf die schöne Darlegung des Strahlenganges und der Geschwindigkeitsverteilung der Erdbebenwellen im Erdkörper. Diese Ausführungen und die Beschreibung der Erdbebeninstrumente und ihrer Wirkungsweise sind auch besonders reichlich durch gute Abbildungen und Textfiguren unterstützt, mit denen jedoch auch in anderen Abschnitten nicht gekargt ist.

Entsprechend der Arbeitsrichtung des Verfassers treten die eigentliche Geologie und Geographie der Erdbeben mit ihren Methoden mehr zurück; aber auch hier wirken die originalen seismogenetischen Betrachtungen über die Entstehung von Spannungen und ihren Ausgleich in der Erdkruste sehr anregend. Ebenso mag noch die Wiedergabe der lehrreichen Siebergschen Karte vom makroseismischen Schüttergebiet des mitteleuropäischen Erdbebens am 16. November 1911 besonders erwähnt werden.

Ein zweckmäßiges Literaturverzeichnis und Sachregister beschließen das sehr empfehlenswerte, vortrefflich ausgestattete Buch. E. Tams, Hamburg.

Briefwechsel zwischen Carl Friedrich Gauss und Christian Ludwig Gerling. Herausgegeben im Auftrage der Gesellschaft zur Beförderung der gesamten Naturwissenschaften zu Marburg von Clemens Schaefer. Berlin: Otto Elsner 1927. XX, 820 S., ein Bildnis Gerlings und ein Faksimilebrief von Professor Schweikart an Gauss. 17×25 cm. Preis geh. RM 35.—, geb. RM 40.—.

Den äußeren Anlaß zum Erscheinen dieses Prachtbandes bot der Wunsch, gelegentlich der Vierhundertjahrfeier der Universität Marburg das Andenken an den ehemaligen Professor der Physik in Marburg, Christian Ludwig Gerling, zu erneuern. Über seine Person unterrichten einige leider etwas zu knapp gehaltene Bemerkungen in dem Vorworte Schaefers, während bei Gauss selbstverständlich derartige orientierende Bemerkungen überflüssig schienen. Der Briefwechsel erstreckt sich ohne größere Unterbrechungen vom Jahre 1810 bis zum Jahre 1854, d. h. praktisch bis zum Tode von Gauss (Febr. 1855). Man gewinnt den Eindruck, daß es in viel höherem Maße die persönliche Sympathie war, welche das enge Freundschaftsband zwischen den Männern knüpfte, als die gemeinsamen wissenschaftlichen Interessen. Die in dem Briefwechsel diskutierten wissenschaftlichen Fragen stehen auf einem ungleich elementareren Niveau als z. B. die in den Briefen zwischen Gauss und Bessel erörterten; dafür nehmen persönliche Angelegenheiten einen viel größeren Raum ein. Meist ist es Gerling, der sich über elementare mathematische Fragen Auskunft bei Gauss holt, oder der Gauss um Erklärung von ihm nicht verstandener Stellen der Gaussschen Abhandlungen bittet. Gauss gibt die gewünschte Aufklärung stets und offenbar gern, so sehr es manchmal für ihn ein Herabsteigen von seinem hohen Standpunct bedeutet, zu dem man ihn bei seiner sonstigen Strenge in der Beurteilung anderer kaum für geneigt gehalten hätte. Es würde zu weit führen, alle bei einem über vierzig Jahre dauernden regen Verkehr zur Sprache kommenden Gegenstände aufzuzählen, und so mag die Erwähnung einiger besonders interessanter Einzelheiten genügen: Ein Bericht von Gauss über den Hergang bei seiner Entdeckung der Construirbarkeit des Siebzehneckes mit Cirkel und Lineal, die Tatsache, daß Gauss durchschaute, daß die Bestimmung der Volumina räumlicher Polyeder ohne Benutzung eines Infinitesimalprincips nicht durchführbar sei, die Erörterung zahlreicher auf die praktische Geodäsie bezüglicher Fragen, und endlich, um etwas mehr Amüsantes zu nennen, die Versuche Gerlings über das berüchtigte Tischrücken.

Neben der Wissenschaft spielt das Privatleben der beiden Männer in ihrer Correspondenz eine große Rolle. Hier zeigt sich manchmal GERLING als der besser in der Welt erfahrene und mehrmals wendet sich der viel ältere GAUSS an ihn Hilfe suchend. So sehr nun auch die persönlichen Angelegenheiten geeignet sind, die Charaktere zu beleuchten und verstehen zu lehren, ich kann nicht umhin, einzugestehen, daß mich die Preisgabe dieser Dinge an die Öffentlichkeit, insbesondere der Störungen des Gleichgewichts im Familienleben von GAUSS, auf das Peinlichste berührt und daß ich in ihr eine grobe Pietätlosigkeit erblicke. Der Wissenschaft wird dadurch in keiner Weise gedient, und das einzige Ergebnis kann die Verbreitung häßlichen Klatsches sein. Wer einen Briefwechsel herauszugeben hat, sollte sich immer fragen, ob er möchte, daß in hundert Jahren alle Welt in seine eigenen intimsten Angelegenheiten hineinsehen kann, selbst wenn dabei auf ihn und die Seinen nur das beste Licht fällt. In diesem Falle war sogar eine Mahnung zur Vorsicht vorhanden; einige solche Dinge berührenden Briefe von GERLING an GAUSS fehlen, sind also vermutlich schon von GAUSS selbst vernichtet worden.

Die Anordnung ist folgende: Das Buch wird durch ein Vorwort SCHAEFERS eingeleitet, in dem unter anderem die Redactionsprincipien erklärt sind. Die durchgängige Transscription in die moderne Orthographie wird nicht jedermann's Beifall finden; dagegen wird jeder Benutzer dem Herausgeber dankbar sein, daß er zu den vorkommenden Personennamen in Anmerkungen die nötigsten Erläuterungen gibt. Dann folgt eine bequeme Zeittafel über den Ablauf der ganzen Correspondenz, dann der Text der Briefe selbst und zum Schluß ein alphabetisches Namen- und Sachregister.

Der Band ist äußerlich vorzüglich ausgestattet, bestes weißes Papier und sauberer klarer Druck; etwas weniger fette Typen im Textsatz würden meines Erachtens gefälliger wirken. E. BESSEL-HAGEN, Halle.

Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin.

In der Fachsitzung am 20. Februar 1928 berichtete Professor K. GRIPP (Hamburg) über **die Ergebnisse der Hamburgischen Spitzbergen-Expedition 1927, insbesondere über Brodelboden und Moränenlandschaften.**

Die Endmoränen Norddeutschlands bilden Wälle, mitunter von 40—60 m Höhe, deren Material stellenweise sandig-kiesig und in anderen Gebieten, nicht weit davon entfernt, tonig ist. Der Vortragende hat es sich zur Aufgabe gemacht, die während der Eiszeit in Norddeutschland entstandenen Oberflächenformen mit den heute in Polargebieten vorhandenen zu vergleichen und dadurch die Entstehung der Glaziallandschaft bei uns zu erklären. Einer im Jahre 1925 zu diesem Zweck unternommenen Reise nach Spitzbergen hat er 1927 eine zweite folgen lassen, die namentlich dem Studium der Gletschermoränen gewidmet war und vor allem der Frage: Wie kommt die Grundmoräne unter dem Eise heraus? Zahlreiche Gletscher der West- und Ostküste Spitzbergens bis zur Barentsinsel wurden besucht und durch eingehende Untersuchungen u. a. der Eidem-, Holström-, Nathorst-, Penck-, Usher-, Venerngletscher festgestellt, daß bei allen 3 Typen des Entwicklungsstadiums, den vorstoßenden, den wenig und den stark rückweichenden Gletschern die Endmoränenbildung mutatis mutandis in der gleichen Weise erfolgt. Die vor der Gletscherstirn liegenden Moränenwälle sind meist zusammengestauchte Vorschüttungssande, welche oft Meeresablagerungen enthalten. In vielen, vom Grunde bis zur Oberfläche den Gletscherkörper durchsetzenden schutterfüllten Spalten tritt die Grundmoräne am Ende der Gletscherzunge nach oben aus und bedeckt die Oberfläche, wenn das austretende Material sandigkiesig ist, bald in zusammenhängender Schicht, die das Eis vor weiterem Abschmelzen schützt, sobald sie die Mächtigkeit von 2 m erreicht hat. Zahlreiche interessante Einzelerscheinungen wurden in Lichtbildern vorgeführt und näher erläutert, wie z. B. die riesige, dem Holmströmgletscher vorgelagerte Sandrfläche, die im Meere ein Watt bildet und anschließend 30 Staumoränenwälle hintereinander aufweist. Die Schlammablagerungen auf und vor dem Eise erreichen zum Teil große Ausdehnung und Mächtigkeit. Beim Nathorstgletscher taut tonige Grundmoräne aus Spalten aus und bleibt als Lehmmauern und Zinnen bis zu 12 m Höhe auf dem Eise stehen. Infolge der lange andauernden Winterkälte die — 40° erreicht, können sich Eisschichten, welche durch Schuttdecken gegen die sommerliche Abschmelzung geschützt sind, Hunderte oder Tausende von Jahren als totes Eis erhalten. Erst bei Eintritt einer wärmeren Klimaperiode dürfte ein Abschmelzen solcher unterirdischen Eismassen erfolgen, wodurch dann eine kuppige Landschaft entsteht, da das in den Spalten eingeschlossene Grundmoränenmaterial zu Hügeln zusammensinkt.

Überträgt man die Ergebnisse auf die norddeutschen Landschaftsformen, so ergibt sich, daß die Höhen durch Aufstau, die Kames- und kuppigen Grundmoränenlandschaften durch Niedertauen des von grundmoränehaltigen Spalten erfüllten randlichen Teiles des Eises, die Grundmoränenebenen aber durch Abschmelzen des randferneren Eises entstanden sind. Die Drumlins werden als Überbleibsel von schutterfüllten Radialspalten gedeutet, die durch Zerrung in einem sich ausbreitenden Eiskuchen entstehen, und in welche von untenher Grundmoränenmaterial eingedrungen ist.

Die Untersuchungen über den Brodelboden haben die auf der ersten Reise gewonnenen und in dieser Zeitschrift (14, H. 26, S. 627. 1926) berichteten Resultate bestätigt und erweitert. Beim Auftauen des Bodens weist die Grenze von aufgetautem und gefrorenem Erdreich wannenartige Vertiefungen auf, in denen das Wasser und das feine Gesteinsmehl eine Art viscoser Flüssigkeit bilden. Tritt in dieser Flüssigkeit ein umgekehrtes Dichtegefälle auf, so sind die Vorbedingungen für die Ausbildung von Brodelherden gegeben. Auf geneigtem Terrain werden die vertikalen Kreislaufbewegungen in den einzelnen Brodelherden durch die abwärts gleitende Bewegung zu langen Spiralen ausgezogen, so daß schließlich ein Streifenboden resultiert, der namentlich bei dünner Schneebedeckung ins Auge fällt und vor allem in Ostspitzbergen weitverbreitet ist. Im Windschatten der vom Eise kommenden Luftströmung häuft sich feines Material hinter jedem kleinen Stein an, und nur hier bieten sich der Vegetation Entwicklungsmöglichkeiten. Da durch die Brodelbewegung dem Winde immer neues durch Frostsprengung enstandenes Gesteinsmehl von der Tiefe herauf zugänglich gemacht wird, so ist hier eine fast unerschöpfliche Quelle für die Lieferung von Löß gegeben. Auch die Umdrehung der Windkanter in Altmoränengebieten schreibt Professor GRIPP zum Teil der Brodelbewegung zu.

Am 3. März 1928 hielt Geheimrat A. PENCK (Berlin) einen Vortrag mit Lichtbildern über **Arizona.** Der größte Teil des Staatsgebietes wurde 1848 von Mexiko

an die Vereinigten Staaten von Amerika abgetreten, der restierende Südteil 1853 durch Kauf erworben. Auf die Fläche von rund 300 000 qkm kommen nur 330 000 Einwohner. Die tief eingeschnittene Schlucht des Coloradoflusses, der Grand Cañon, trennt die Nordwestecke des Staates völlig ab, so daß nur eine für Fußgänger und Maultiere passierbare Hängebrücke den Verkehr mit diesem isolierten Gebiet vermittelt, das von dem nördlich angrenzenden Staate Utah aus viel leichter zugänglich ist.

Das Klima ist ausgesprochen kontinental. In der Hauptstadt Phoenix ist die Mitteltemperatur des Januar 10°, die des Juli höher als 30°. Schon im Mai erlebte der Vortragende 5 Tage, an denen die Wärme 40° überstieg. Die Lufttrockenheit ist sehr groß. Im Durchschnitt gibt es nur 13 Regentage im Jahre, an denen insgesamt 17 cm Regenfallen.

Das Coloradoplateau, welches den ganzen Nordosten des Landes einnimmt, enthält in der Nähe des Diablo-Cañon ein 200 m tiefes Loch von mehr als 1 km Durchmesser mit erhöhten Rändern, das den äußeren Anblick eines Kraters bietet. Da erloschene Vulkane in Arizona mehrfach vorkommen — auch der höchste Berg des Staates, der 3800 m hohe San-Franzisco-Berg ist ein solcher —, so wurde auch dieses Gebilde anfangs für eine Vulkanruine gehalten. Dann aber fand man rings um den vermeintlichen Vulkankrater zahlreiche Stücke von Meteoreisen, und es ergab sich, daß jene merkwürdige Oberflächenform durch den Aufprall eines riesigen, aus dem Weltraum herabgestürzten Meteorsteins entstanden ist, der an dieser Stelle die Erdoberfläche getroffen und sich in den Erdboden eingegraben hat. Man nennt das Loch daher jetzt Meteorkrater.

Merkwürdigkeiten sind auch die versteinerten Wälder mit ihren mächtigen fossilen Baumstämmen, die aus dem weicheren Untergrund durch die abspülende Tätigkeit des Regens herausgewaschen und freigelegt worden sind. In den steilen Felswänden der Plateauberge finden sich prähistorische Höhlenwohnungen von Indianern, denen die anthropologische Wissenschaft, welche für sie den Fachausdruck „cliff-dwellers" geschaffen hat, großes Interesse entgegenbringt.

Als die großartigste Landschaftsform aber ist jener oben erwähnte Durchbruch des Coloradoflusses durch das Plateauland anzusehen, dessen Oberfläche 2200 bis 2500 m hoch ist. Hier liegen über dem granitischen Grundgebirge flachgelagerte Schichten von Kalksteinen, Sandsteinen und Mergeln, die von den ältesten geologischen Formationen, Kambrium, Karbon bis zum Perm hinaufreichen und deren verschiedene Härte und Widerstandskraft gegen die Verwitterung zur Ausbildung von stufenförmigen Terrassen geführt hat. Die prächtigen Farben des Gesteins, in denen rote Nuancen vorherrschen, die Steilheit der Wände und die abenteuerlichen Felsformen bieten ein Naturgemälde von beispielsloser Schönheit, welches zu den größten Sehenswürdigkeiten der Erde gehört und auf Touristen aller Länder eine gewaltige Anziehungskraft ausübt, die sich namentlich auf den Grand Cañon konzentriert. Diese Schlucht, deren Länge etwa 350 km beträgt, ist dadurch entstanden, daß jene oben erwähnte Gesteinsscholle sich um mehr als 2500 m in einem so langsamen Tempo gehoben hat, daß der auf ihrer Oberfläche fließende Coloradofluß sein Bett in gleichem Maße durch Einschneiden in den Felsgrund vertiefen konnte. Im Laufe von Jahrmillionen hat er sich so bis zu 1500 m tief eingegraben und eine wildzerrissene Talschlucht geschaffen, deren Wände in zahllose Zacken und Türme aufgelöst sind. Tief unten rauscht der Fluß, dessen Fluten durch den mitgeführten Schlamm rotbraun gefärbt sind, weshalb ihm die Spanier den Namen Colorado (der Farbige) gegeben haben. Oben auf dem Plateau aber herrscht ein so großer Wassermangel, daß alles, für wirtschaftliche Zwecke, wie als Trinkwasser benötigte Wasser, täglich durch einen besonderen Eisenbahnzug aus einer Entfernung von 170 km herangeschafft werden muß.

Unten am Flußbett ließen sich an einzelnen Blöcken deutliche Sandschliffwirkungen feststellen, wie wir sie aus Wüsten kennen; nur daß der Sand hier nicht durch den Wind, sondern durch das strömende Flußwasser bewegt, seine korrosive Tätigkeit ausgeübt hat.

An der Hand typischer Lichtbilder diskutierte Penck den Vorgang der Abtragung und Einebnung, der in dem wüstenhaften Klima interessante Probleme aufweist, deren Erörterung hier jedoch zu weit führen würde.

Das Plateau sendet einzelne Gebirgsausläufer nach Südosten in das Tiefland hinein vor, welches den Süden des Staates einnimmt. Zwischen diesen Ausläufern, von denen das schöne, mit Kiefern und Eschen bewaldete Catalinagebirge durch eine Autostraße, welche bis 2800 m zum höchsten Gipfel führt, besonders leicht zugänglich ist, sind ebene Flächen eingeschaltet, Bolsone genannt, die wegen ihres Grundwasserreichtums in dem sonst wüstenhaften Lande Oasen bilden. In einer solchen liegt die Universitätsstadt Tucson, deren künftige maximale Einwohnerzahl man zu 30 000 berechnet hat, weil der Vorrat des Bodens an Grundwasser für eine größere Bewohnerzahl nicht ausreicht.

Ähnlich geartet ist die Oase der Hauptstadt Phönix, in deren Nähe die Indianer schon in vorkolumbischer Zeit ausgedehnte Bewässerungsanlagen geschaffen hatten. Heute sind durch gewaltige Talsperren an engen Stellen der Täler des Rio Gila und seiner oberen Nebenflüsse, insbesondere des Salt River, künstliche Seen angestaut worden, von denen der durch den 100 m hohen Rooseveltdamm geschaffene 30 km lang ist. Zwei andere Dämme sind bereits vollendet, ein vierter ist noch im Bau; nach seiner Vollendung werden 4 treppenförmig übereinanderliegende Stauanlagen das Gefälle des Wassers zur Erzeugung elektrischer Energie ausnutzen und seine Mengen so regulieren, daß sie weiter unterhalb die Oasen bewässern, in deren niederen Teilen Weizen und Baumwolle angebaut und Viehzucht getrieben wird. Hier hat die Landschaft stellenweise holländischen Charakter, während in den höheren Gebieten Citronen, Orangen, Pampelmusen und andere Südfrüchte gedeihen.

Der Unterlauf des Colorado bildet die Grenze zwischen Arizona und Californien. Der letztere Staat will den Wasserreichtum des Flusses für sein Gebiet, insbesondere das wasserbedürftige Los Angeles mit seinen $1^1/_2$ Millionen Einwohnern, ausnutzen und plant die Schaffung großartiger Wasserleitungsanlagen, gegen deren Bau Arizona jedoch heftig protestiert. O. B.

Herausgeber und verantwortlicher Schriftleiter: Dr.-Ing. e. h. DR. ARNOLD BERLINER, Berlin W 9.
Verlag von Julius Springer in Berlin W 9. — Druck der Spamerschen Buchdruckerei in Leipzig.